

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**PROCESO DE TOMA DE DECISIÓN ENTRE EJECUTAR UN  
TÚNEL CON TBM O A CIELO ABIERTO MEDIANTE EL  
EMPLEO DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS MULTICRITERIO**

### Autor/a

**JOSÉ RUIZ GRACIA**

### Tutor/a

**JAVIER PABLO AINCHIL LAVIN  
ANTONIO AGUADO DE CEA**

### Departament

**ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ**

### Intensificació

**ENGINYERIA DEL TERRENY**

### Data

**JUNIO 2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

Un trabajo de las características y del alcance de la presente tesina no se puede llevar a cabo sin la ayuda y el apoyo de algunas personas que me han dado sus consejos y conocimientos. Valgan estas líneas como agradecimiento de todo lo que han hecho por mí, para que este trabajo saliera a la luz de la mejor manera posible.

Quiero en primer lugar agradecer a mis dos tutores de la tesina Javier Pablo Ainchil Lavin y Antonio Aguado De Cea que me han ayudado en todo momento y que han realizado las correcciones de este trabajo dándome en todo momento la posibilidad de mejorarlo. Tengo que agradecerles en este sentido los comentarios, sugerencias y correcciones que me han guiado en la elaboración de esta tesina. Agradecer también las reuniones realizadas con ellos fuera de sus horarios de trabajo habituales y que me han servido para clarificar y enfocar el trabajo. En este sentido quiero dejar constancia de la comprensión que han mostrado por su parte debido a mi dificultad por mantener un ritmo constante de trabajo en la realización de la tesina por mis circunstancias laborales.

En segundo lugar quisiera agradecer a Ignacio Sáenz de Santamaría, Ingeniero de Caminos y ex-compañero de trabajo, por la ayuda prestada en la presente tesina. La aportación realizada en su caso corresponde a la utilización de la herramienta desarrollada en su tesina para la estimación del plazo y del coste de la alternativa de excavación del túnel mediante tuneladora. Agradezco a mi antiguo compañero de trabajo la colaboración y apoyo que desde un primer momento me ha brindado para poder utilizar los resultados procedentes de su tesina y que han sido de suma utilidad en el presente trabajo.

Quiero hacer mención también a mis compañeros de trabajo por su interés en ver finalizada una tesina que será el punto y final de mis estudios de ingeniería de caminos. Mención especial en este caso a Carlos López Carrera por su sugerencia de considerar el tramo 2 de L9 para la aplicación del análisis de las alternativas y que rápidamente adopté.

No querría dejar de realizar en este apartado de agradecimientos una mención a mi familia que en todo momento me ha mostrado su apoyo a pesar de la constante sustracción de tiempo que representa la realización de la presente tesina. Quiero agradecer especialmente a mi mujer Pilar la comprensión y paciencia que de manera constante ha mostrado a lo largo de la realización de mis estudios y la elaboración de este trabajo. También incluyo en este reconocimiento al resto de mi familia que de forma constante han sido un apoyo en mis estudios.

Finalmente no quisiera finalizar este apartado sin expresar mi reconocimiento a toda una serie de personas que a lo largo de mi vida académica y laboral me han aportado conocimientos y reflexiones que componen en una parte importante las herramientas que me sirven para afrontar los retos del día a día. A todos ellos muchas gracias.

**Título:** Proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con TBM o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio

**Autor:** José Ruiz Gracia

**Tutores:** Javier Pablo Anchil, Antoni Aguado De Cea

**Palabras clave:** Toma de decisión – Túnel con TBM – Túnel a cielo abierto – Requerimientos – Criterios – Indicadores – Árbol de requerimientos – Función de valor – Índice de valor.

## **RESUMEN**

En entornos urbanos el desarrollo de las infraestructuras y del espacio subterráneo debe en particular cumplir con los requisitos para un desarrollo sostenible. Este tipo de desarrollo plantea un desafío tanto desde el punto de vista de los explotadores como de los planificadores, diseñadores o constructores. Se trata de llevar a cabo la construcción para la situación presente de una forma que perturbe lo menos posible las actividades cotidianas de las ciudades y en un futuro garantizando la calidad, seguridad, tiempo y objetivos de coste en el desarrollo.

Los principales métodos de excavación de túneles los podemos agrupar en lo que consideramos métodos convencionales de excavación subterránea, la excavación mediante tuneladoras y la excavación a cielo abierto (cut and cover). En esta tesina se han considerado los dos últimos métodos.

El objetivo de la presente tesina corresponde a la elaboración de una metodología así como de una herramienta que sirva para el proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con tuneladora o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio.

Con el fin de alcanzar el citado objetivo se ha construido un modelo jerárquico formado por tres niveles que corresponden a requerimientos, criterios e indicadores. En el primer nivel se han considerado tres requerimientos relacionados con el aspecto económico, social y del medioambiente. A partir de estos tres ejes se construye el árbol de requerimientos del modelo. El árbol de requerimientos constituye la herramienta que nos ha de permitir llevar a cabo la valoración de las diferentes alternativas.

La valoración de las alternativas comprende distintas etapas que comprenden la ponderación de cada nivel de jerarquía mediante la asignación de pesos a cada uno de los elementos, la construcción de las funciones de valor de cada uno de los indicadores, el cálculo del valor de las alternativas para finalmente determinar cuál es la alternativa óptima según el modelo elaborado. La valoración se ha llevado a cabo mediante la metodología MIVES –Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles a través de una herramienta desarrollada en el entorno de la UPC. Mediante el proceso realizado se obtiene un soporte riguroso para la evaluación que se realizará.

**Title:** Decision-making process between running a tunnel with TBM or opencast by using multi-criteria analysis techniques

**Author:** José Ruiz Gracia

**Tutors:** Javier Pablo Anchil, Antoni Aguado De Cea

**Key words:** Decision making - tunnel with TBM - Tunnel opencast - Requirements - Criteria - Indicators - Tree requirements - Function value - index value

## **SUMMARY**

In urban environments the development of infrastructure and underground space should, in particular, meet the requirements for sustainable development. This type of development poses a challenge from the point of view of operators, planners, designers and builders - namely in the present, carrying out the construction in a way that minimizes the disturbance to everyday activities in cities and in the future to ensure the quality, safety, time and budgetary objectives of development.

The principal methods of tunneling can be respectively grouped as what we consider conventional methods of underground excavation, excavation by TBMs and open pit (cut and cover). This thesis addresses is concerned with the latter two methods.

The aim of this thesis is to present a methodology and a tool for systematically arbitrating between the options of running a tunnel boring machine or open pit by using multi-criteria analysis techniques.

In order to achieve that objective, a hierarchical model is deployed consisting of three levels corresponding respectively to requirements, criteria and indicators. The first level focuses on three particular aspects of requirements: economic, social and environmental. From the three-tier analysis, a decision tree model is constructed. The requirements tree then constitutes the tool that facilitates the structured evaluation of competing development alternatives.

The assessment of options includes various steps comprising the weighting of each level of the hierarchy, the building of value functions for each of the indicators and the determination of a quantified appraisal for each alternative in order to arrive at the optimal choice of approach according to the model developed. The assessment has been carried out by MIVES - Model integrated methodology for sustainable value assessments. This is a tool developed in the environment of the UPC.

Using this methodology rigorous, process-based support can be provided for the evaluation being carried out.



## ÍNDICE DE LA TESINA

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.2.1. Objetivos generales.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. METODOLOGÍA.....	4
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESINA.....	4
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	6
2.1. INTRODUCCIÓN .....	6
2.2. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.....	6
2.2.1. Tuneladora (TBM) .....	7
2.2.2. Cielo abierto .....	11
2.2.3. Comparación tuneladora y cielo abierto.....	13
2.2.4. Cuestiones que deben abordarse en la evaluación del método preferido de construcción .....	15
2.3. TRAMO DE ANÁLISIS DE LA ZONA FRANCA DE BARCELONA.....	16
2.3.1. Tramo analizado .....	17
2.3.2. Geología y geotecnia de la zona.....	19
2.4. ALTERNATIVAS CONSIDERADAS .....	22
2.4.1. Alternativa con tuneladora .....	22
2.4.2. Alternativa a cielo abierto.....	25
3. ANÁLISIS MULTICRITERIO .....	28
3.1. INTRODUCCIÓN .....	28
3.2. TERMINOLOGIA ANÁLISIS MULTICRITERIO .....	29
3.3. CLASIFICACIÓN TOMA DE DECISIÓN .....	31
3.3.1. Según estado del entorno .....	31
3.3.2. Según el número de aspectos de decisión .....	31
3.3.3. Según la naturaleza de las alternativas.....	31
3.3.4. Según las características del decisor .....	32

3.4. CLASIFICACIÓN METODOLOGÍAS TOMA DECISIONES .....	32
3.5. METODOLOGÍA TOMA DE DECISIÓN EMPLEADA.....	32
3.5.1. Clasificación de la toma de decisión realizada .....	33
3.5.2. Corriente metodológica de la toma de decisión utilizada .....	33
3.5.3. Ordenación de los aspectos a estudiar .....	34
3.5.4. Función de valor utilizada .....	35
3.5.5. Tipo de agregación a utilizar .....	35
3.5.6. Tipo de asignación de pesos.....	36
3.5.7. Síntesis elección metodología empleada .....	36
3.6. IMPLEMENTACIÓN TOMA DE DECISIÓN EMPLEADA .....	37
3.6.1. Delimitación de la decisión .....	38
3.6.2. Árbol de toma de decisión .....	39
3.6.3. Funciones de valor .....	40
3.6.4. Asignación de pesos .....	43
3.6.5. Definición de las alternativas .....	44
3.6.6. Índice de valor de las alternativas.....	44
3.6.7. Análisis de sensibilidad.....	45
3.6.8. Contraste de resultados .....	46
4. ARBOL DE REQUERIMIENTOS .....	47
4.1. INTRODUCCIÓN .....	47
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA .....	48
4.2.1. Problema general .....	48
4.2.2. Características específicas de los túneles .....	48
4.3. DEFINICIÓN DE LAS ALTERNATIVAS .....	50
4.3.1. Alternativa túnel con tuneladora .....	50
4.3.2. Alternativa a cielo abierto .....	51
4.3.3. Listado de chequeo (verificaciones).....	51
4.4. LÍMITES DEL SISTEMA.....	52
4.4.1. Árbol de decisión.....	53
4.5. DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONES DE VALOR .....	53
4.5.1. Coste inicial de construcción.....	55
4.5.1.1. Objetivo .....	55

4.5.1.2. Forma de valorar .....	55
4.5.1.3. Función de valor .....	56
4.5.2. Desviación del coste .....	56
4.5.2.1. Objetivo .....	56
4.5.2.2. Forma de valorar .....	56
4.5.2.3. Función de valor .....	57
4.5.3. Coste de mantenimiento .....	57
4.5.3.1. Objetivo .....	57
4.5.3.2. Forma de valorar .....	57
4.5.3.3. Función de valor .....	58
4.5.4. Tiempo de construcción .....	58
4.5.4.1. Objetivo .....	58
4.5.4.2. Forma de valorar .....	58
4.5.4.3. Función de valor .....	59
4.5.5. Desviación temporal .....	59
4.5.5.1. Objetivo .....	59
4.5.5.2. Forma de valorar .....	60
4.5.5.3. Función de valor .....	61
4.5.6. Molestias para el productor .....	62
4.5.6.1. Objetivo .....	62
4.5.6.2. Forma de valorar .....	62
4.5.6.3. Función de valor .....	63
4.5.7. Seguridad del operario .....	64
4.5.7.1. Objetivo .....	64
4.5.7.2. Forma de valorar .....	64
4.5.7.3. Función de valor .....	65
4.5.8. Molestias al entorno .....	65
4.5.8.1. Objetivo .....	65
4.5.8.2. Forma de valorar .....	65
4.5.8.3. Función de valor .....	66
4.5.9. Cantidad de energía consumida .....	67
4.5.9.1. Objetivo .....	67

4.5.9.2. Forma de valorar .....	67
4.5.9.3. Función de valor .....	67
4.5.10. Cantidad de hormigón consumido .....	68
4.5.10.1. Objetivo .....	68
4.5.10.2. Forma de valorar .....	68
4.5.10.3. Función de valor .....	68
4.5.11. Cantidad de acero consumido .....	69
4.5.11.1. Objetivo .....	69
4.5.11.2. Forma de valorar .....	69
4.5.11.3. Función de valor .....	69
4.5.12. Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido .....	70
4.5.12.1. Objetivo .....	70
4.5.12.2. Forma de valorar .....	70
4.5.12.3. Función de valor .....	70
4.5.13. Resumen de las funciones utilizadas .....	71
4.6. ASIGNACIÓN DE PESOS .....	71
5. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS .....	75
5.1. INTRODUCCIÓN .....	75
5.2. EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS .....	76
5.2.1. Ponderación de pesos .....	76
5.2.2. Funciones de valor .....	77
5.3. RESPUESTAS DE LAS ALTERNATIVAS .....	77
5.4. REQUERIMIENTO ECONÓMICO .....	79
5.4.1. Criterio costes .....	79
5.4.1.1. Coste inicial de construcción .....	79
5.4.1.2. Desviación probable del coste .....	80
5.4.1.3. Coste de mantenimiento .....	81
5.4.2. Criterio tiempo .....	81
5.4.2.1. Tiempo de construcción .....	82
5.4.2.2. Desviación temporal .....	83
5.5. REQUERIMIENTO SOCIAL .....	85
5.5.1. Criterio efectos para el productor .....	85

5.5.1.1. Molestias para el productor .....	85
5.5.1.2. Seguridad del operario .....	87
5.5.2. Criterio efectos a terceros.....	87
5.6. REQUERIMIENTO MEDIOAMBIENTE .....	88
5.6.1. Criterio consumos .....	88
5.6.1.1. Cantidad de energía consumida.....	89
5.6.1.2. Cantidad de hormigón consumido .....	89
5.6.1.3. Cantidad de acero consumido.....	90
5.6.2. Criterio emisiones .....	90
5.6.2.1. Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido .....	90
5.7. CÁLCULO DEL VALOR DE LAS ALTERNATIVAS.....	91
6. CONCLUSIONES .....	96
6.1. INTRODUCCIÓN .....	96
6.2. CONCLUSIONES GENERALES .....	96
6.3. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS .....	97
6.3.1. Conclusiones sobre el tramo de análisis .....	97
6.3.2. Conclusiones sobre el análisis multicriterio .....	98
6.3.3. Conclusiones acerca del análisis del método .....	98
6.3.4. Conclusiones sobre los indicadores y funciones de valor .....	99
6.3.5. Conclusiones sobre la evaluación de alternativas y resultados .....	99
6.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	100
7. BIBLIOGRAFÍA .....	101
ANEJO A: ESTIMACIÓN DEL PLAZO Y COSTE DE LA ALTERNATIVA CON TUNELADORA .....	104
INTRODUCCIÓN .....	104
INTRODUCCIÓN DE DATOS.....	105
RESULTADOS OBTENIDOS .....	105
ANEJO B: CÁLCULO DE PANTALLAS ALTERNATIVA EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO .....	107
INTRODUCCIÓN .....	107
DATOS DE PARTIDA .....	108
RESULTADOS DEL CÁLCULO .....	109
ANEJO C: PRESUPUESTO ALTERNATIVA EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO .....	133
INTRODUCCIÓN .....	133

MEDICIONES.....	133
CUADRO DE PRECIOS.....	139
PRESUPUESTO .....	146
RESUMEN DE PRESUPUESTO.....	149
ANEJO D: PLAZO DE EJECUCIÓN ALTERNATIVA EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO.....	150
INTRODUCCIÓN .....	150
ACTIVIDADES Y RENDIMIENTOS .....	151
PLAN DE TRABAJO .....	151
ANEJO E: CUANTIFICACIÓN INDICADOR DE SEGURIDAD DEL OPERARIO .....	154
INTRODUCCIÓN .....	154
RIESGOS LABORALES Y ACTIVIDADES.....	155
EVALUACIÓN DE RIESGOS LABORALES.....	157
ANEJO F: CUANTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DEL REQUERIMIENTO MEDIOAMBIENTE ..	160
INTRODUCCIÓN .....	160
CUANTIFICACIÓN DEL INDICADOR ENERGÍA CONSUMIDA.....	161
CUANTIFICACIÓN DEL INDICADOR HORMIGÓN CONSUMIDO.....	162
CUANTIFICACIÓN DEL INDICADOR ACERO CONSUMIDO.....	163
CUANTIFICACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	163
ANEJO G: DATOS Y RESULTADOS DE LOS MÓDULOS DEL PROGRAMA MIVES .....	165
INTRODUCCIÓN .....	165
DATOS MÓDULO PROGRAMADOR.....	166
RESULTADOS MÓDULO REPORTE .....	168

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Vista de una TBM para roca tipo Topo (imagen cortesía de Herrenknecht AG). .....	8
Figura 2.2: Vista de una TBM para suelo y roca blanda tipo EPB (imagen cortesía de Herrenknecht AG). .....	8
Figura 2.3: Elementos que conforman una tuneladora de doble escudo (imagen procedente de <a href="http://www.bioceanicoaconcagua.com">www.bioceanicoaconcagua.com</a> ). .....	10
Figura 2.4: Sección de terreno con tuneladora excavando con disco de corte, cabeza con el escudo y tren de apoyo junto con el sostenimiento (imagen procedente de Seguridad en el trabajo con tuneladoras). .....	11
Figura 2.5: Esquema de las partes básicas de un anillo de dovelas (Bloom, 2002). .....	11
Figura 2.6: Método constructivo de túneles a cielo abierto Método “bottom-up” (imagen procedente de <a href="http://www.railsystem.net">http://www.railsystem.net</a> ). .....	12
Figura 2.7: Método constructivo de túneles a cielo abierto Método “top-down” (imagen procedente de <a href="http://www.railsystem.net">http://www.railsystem.net</a> ). .....	12
Figura 2.8: Características, tramos y estaciones de la L9 de Barcelona (Fuente: <a href="http://Infraestructures.cat">Infraestructures.cat</a> ). .....	16
Figura 2.9: Estaciones del tramo 2 de la Línea 9 en el sector de la Zona Franca (Fuente: <a href="http://Infraestructures.cat">Infraestructures.cat</a> ). .....	18
Figura 2.10: Ortofoto de la zona donde se ubica el tramo 2 de la línea 9 en el sector de la Zona Franca de Barcelona construida en viaducto (Fuente: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya ICGC). .....	18
Figura 2.11: Plano geológico de la depresión de Barcelona con indicación del trazado de la L9 y del sector en estudio de la Zona Franca (Fuente <a href="http://Infraestructures.cat">Infraestructures.cat</a> ). .....	20
Figura 2.12: Perfil geotécnico del tramo 2 de la línea 9 en la zona de estudio entre el pozo de acceso y las estaciones de la Zona Franca (Fuente: <a href="http://Infraestructures.cat">Infraestructures.cat</a> ). .....	21
Figura 2.13: Tuneladora tipo EPB de 9,4 m de diámetro empleada para la construcción del tramo 1 de la L9 de Barcelona (Fuente <a href="http://Infraestructures.cat">Infraestructures.cat</a> ). .....	23
Figura 2.14: Resultado del análisis Tuneladora tipo EPB de 9,4 m de diámetro empleada para la construcción del tramo 1 de la L9 de Barcelona (elaborado mediante aplicación desarrollada en tesina de Ignacio Saenz de santamaria 2011). .....	24
Figura 2.15: Esquema de la sección tipo de pantallas consideradas para la fase de máxima excavación del recinto entre pantallas del cálculo realizado mediante el programa Cype pantallas. ....	26
Figura 2.16: Plan de obra de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto. ....	27
Figura 3.1: Estructura general de la toma de decisión (Fuente: manual MIVES). .....	38

Figura 3.2: <i>Árbol de toma de decisión genérico (Fuente: manual MIVES)</i> . ....	39
Figura 3.3: <i>Formas que adopta la función de valor para diferentes valores de <math>P_i</math> (Fuente: manual MIVES)</i> .....	42
Figura 3.4: <i>Obtención del índice de valor de las alternativas (Fuente: manual MIVES)</i> .....	44
Figura 4.1: <i>Sección de tuneladora de 9,40 m (L9)</i> . ....	49
Figura 4.2: <i>Sección de recinto entre pantallas (Cype muros pantalla)</i> . ....	49
Figura 4.3: <i>Función de valor del indicador coste inicial de construcción</i> . ....	56
Figura 4.4: <i>Función de valor del indicador desviación del coste (en %)</i> . ....	57
Figura 4.5: <i>Función de valor del indicador coste de mantenimiento</i> . ....	58
Figura 4.6: <i>Función de valor del indicador tiempo de construcción</i> . ....	59
Tabla 4.3: <i>Puntuación del indicador de desviación temporal</i> .....	60
Figura 4.7: <i>Función de valor del indicador desviación temporal</i> .....	61
Figura 4.8: <i>Función de valor del indicador molestias para el productor</i> . ....	63
Figura 4.9: <i>Función de valor del indicador seguridad del operario</i> . ....	65
Figura 4.10: <i>Función de valor del indicador molestias al entorno</i> .....	66
Figura 4.11: <i>Función de valor del indicador cantidad de energía consumida</i> . ....	67
Figura 4.12: <i>Función de valor del indicador cantidad de hormigón consumido</i> .....	68
Figura 4.13: <i>Función de valor del indicador cantidad de acero consumido</i> . ....	69
Figura 4.14: <i>Función de valor del indicador cantidad de <math>CO_2</math> emitido</i> . ....	70
Tabla 4.11: <i>Matriz de pesos para los indicadores del criterio de consumos</i> .....	74
Figura 5.1: <i>Desglose de costes en túneles para un periodo de 30 años (Fuente: Piarc)</i> . ....	81
Figura 5.2: <i>Plazo normal de ejecución de la alternativa de túnel ejecutado mediante tuneladora (Elaborado mediante la aplicación desarrollada en su tesina por Ignacio Sáenz de Santamaría)</i> . .....	82
Figura 5.3: <i>Plan de obra realizado de la alternativa de túnel ejecutado a cielo abierto</i> . ....	83
Figura 5.4: <i>Índices de valor para cada uno de los requerimientos y las alternativas consideradas</i> .....	94



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros geotécnicos de cada una de las unidades diferenciadas en el proyecto de L9 (Fuente: Infraestructures.cat). .....	21
Tabla 3.1: <i>Parámetros de la función de valor</i> .....	42
Tabla 3.2: Escala de comparación por pares propuesto por Saaty (1980) AHP.....	43
Tabla 4.1: Requerimientos de obligado cumplimiento en una infraestructura de metro.....	51
Tabla 4.2: <i>Árbol de requerimientos</i> .....	53
Tabla 4.4: Puntuación del indicador de las molestias para el productor.....	63
Tabla 4.5: Evaluación de riesgos laborales en función de su probabilidad y gravedad.....	64
Tabla 4.6: <i>Puntuación del indicador de molestias al entorno</i> .....	66
Tabla 4.7: <i>Tabla resumen de las funciones de valor consideradas</i> .....	71
Tabla 4.8: <i>Árbol de requerimientos</i> .....	72
Tabla 4.9: Comparación por pares para el cálculo de pesos mediante AHP.....	73
Tabla 4.10: Matriz de pesos para los indicadores del criterio de costes .....	74
Tabla 5.1: Valores de pesos de ponderación para el árbol de requerimientos .....	77
Tabla 5.2: Tabla resumen de las funciones de valor consideradas y sus parámetros .....	78
Tabla 5.3: Tabla con los índices de valor de cada indicador para las alternativas consideradas	79
Tabla 5.4: Puntuaciones para las alternativas del indicador de desviación temporal.....	84
Tabla 5.5: Puntuaciones para las alternativas del indicador de las molestias para el productor	86
Tabla 5.6: Puntuaciones para las alternativas del indicador de molestias al entorno.....	88
Tabla 5.7: Resultados del índice de valor para la alternativa de excavación del túnel con tuneladora.....	92
Tabla 5.8: Resultados del índice de valor para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto .....	93
Tabla 5.9: Pesos asignados en el análisis de sensibilidad a los diferentes requerimientos y valoración de las alternativas en cada uno de los análisis.....	95

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El túnel y la construcción de espacios subterráneos constituyen una actividad humana realizada desde los orígenes de la historia que en sus primeros pasos se funde con el arte de la minería. De las minas del Neolítico a la ocupación del espacio subterráneo en las ciudades actuales pasando por ejemplos históricos como el túnel de Semiramis bajo el Eufrates o el túnel de Brunel bajo el Támesis el hombre ha llevado a cabo de forma continua excavaciones en el terreno creando espacios subterráneos para diferentes usos.

Los principales métodos de excavación de túneles los podemos agrupar en lo que consideramos métodos convencionales de excavación subterránea, la excavación mediante tuneladoras y la excavación a cielo abierto (cut and cover).

Entre los métodos convencionales de excavación de túneles podemos citar el método belga, el método alemán o el Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles (NATM). Estos métodos de excavación no se han considerado en la presente tesina. La excavación de túneles mediante tuneladoras incluyen el empleo de escudos, hidroescudos y EPB's (Earth Pressure Balanced) en función de las características de la excavación y el terreno. La excavación a cielo abierto incluye la ejecución previa de los elementos de contención del terreno, la excavación del recinto y la cobertura posterior para restablecer la geometría original en superficie. Una descripción más amplia de los métodos de excavación mediante tuneladora y a cielo abierto se recoge en el siguiente capítulo de la presente tesina.

La ingeniería asociada a la excavación de túneles ha realizado un progreso muy significativo durante el pasado siglo XX. Los principales factores que han contribuido de manera decisiva a este avance corresponden a las mejoras en las técnicas de excavación con un uso cada vez más eficiente de la energía (voladoras, tuneladoras, rozadoras), los avances en el uso de materiales como el acero y el hormigón en los sostenimientos o que permiten la inyección del terreno, las notables mejoras en las condiciones de trabajo con sistemas de ventilación, iluminación o bombeo de agua y finalmente los nuevos métodos de diseño y construcción entre los que se incluyen el NATM.

La ejecución de túneles mediante tuneladoras se puede considerar que se inició salvo casos puntuales a partir de la segunda mitad del siglo XX. Se trata por tanto de una tecnología de excavación de túneles que puede considerarse reciente en el tiempo. A pesar de este hecho se ha producido una gran expansión en su uso, que ha sido espectacular en los últimos treinta años. La tendencia de un mayor uso de esta técnica de excavación de túneles ha venido acompañada de cambios tecnológicos importantes que se han traducido en una mejora de las prestaciones de las tuneladoras la vez que se ampliaba el abanico de tipologías y prestaciones de las mismas.

Las razones del incremento en el uso de tuneladoras hay que buscarlas en diversos factores. Uno de los mayores beneficios en el uso de túnelados en excavación de túneles corresponde a la mitigación de las molestias que produce en superficie. Este factor es de suma importancia en el caso de infraestructuras subterráneas que tengan que construirse en entornos urbanos. Otro de los factores que juegan a favor del empleo de tuneladoras son los elevados rendimientos que se consiguen con estas máquinas si se comparan con otros métodos de excavación de túneles. Además en terrenos complicados con presencia de agua y materiales sueltos ofrecen un sistema de excavación fiable y con un riesgo menor comparado con otros sistemas de excavación. Los desarrollos recientes han llevado a una mayor versatilidad en este tipo de maquinaria frente a situaciones y condicionantes de excavación diversos.

La ejecución de túneles mediante tuneladora no se encuentra exenta de desventajas como corresponde al hecho de que se trata de una tecnología que para que su uso se considere rentable debemos de tener una longitud mínima del túnel a excavar para poder amortizar el precio de la máquina y el tiempo de diseño, fabricación y transporte de la misma. Otro factor que juega en contra del empleo de las tuneladoras corresponde a que se requieren trazados con radios de curvatura elevados ya que estas máquinas no aceptan curvas cerradas. Finalmente como condicionante adicional tenemos que la sección excavada tendrá que ser forzosamente con una geometría circular al tratarse de túneles excavados con cabeza giratoria.

En la presente tesina se recogen los trabajos y resultados relativos al proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel mediante tuneladora o mediante excavación a cielo abierto. Este proceso se realiza mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio.

Para llevar a cabo el desarrollo de un método para la discriminación del método de ejecución, se utilizan las metodologías y conocimientos basados en el análisis de toma de decisión multicriterio. Esta metodología engloba una serie de conceptos, métodos y técnicas con el objetivo de servir de ayuda en la toma de decisiones que impliquen una serie de criterios diferentes que pueden encontrarse incluso en conflicto y responder a múltiples intereses.

Para la realización del análisis se desarrollará una herramienta basada en el principio de composición jerárquica a través de un árbol de decisiones. Mediante los parámetros de esta herramienta de toma de decisión se estructurará el análisis de cada una de las alternativas facilitando al final la elección de mejor opción. La elección se realiza finalmente después de que a cada una de las alternativas le sea asignada una función de valor que dependerá de los parámetros considerados. El proceso permite realizar una comparación entre las opciones de forma rápida, sencilla y objetiva.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivos generales**

El objetivo general de esta tesina corresponde a realizar un análisis multicriterio mediante la aplicación de un Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles (MIVES) con el fin de evaluar las diferentes alternativas de construcción de un túnel en entorno urbano. La metodología MIVES ya ha sido aplicada para realizar análisis multicriterio en diferentes campos de la ingeniería.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Para poder alcanzar el objetivo general de la presente tesina se deberán cumplir estos objetivos específicos:

- Determinar si la metodología a emplear puede utilizarse en el caso de decisión realizado en esta tesina. Para ello se ha llevado a cabo un estudio del estado del conocimiento de las metodologías de toma de decisión multicriterio existentes para establecer cuál de ellas es adecuada y se analiza como encajar la misma en la herramienta empleada.
- Estudio de las dos alternativas consideradas en la ejecución de túneles en entornos urbanos.
- Creación del árbol de decisiones y la caracterización de los pesos y funciones asociadas a de los diferentes indicadores.

- Obtención del índice de valor de ambas alternativas aplicadas al caso concreto de un tramo de túnel en entorno urbano.

### 1.3. METODOLOGÍA

Los temas estudiados en esta tesina comprenden un análisis de las dos opciones de construcción de túneles en un entorno urbano (tuneladora y excavación a cielo abierto). El estudio se ha centrado en tres aspectos que son un estudio de los métodos de elección multicriterio, la construcción de un árbol de decisiones para poder realizar la elección y finalmente la aplicación del método desarrollado a un caso concreto de tramo urbano con el fin de determinar la opción más adecuada.

El análisis de alternativas para la ejecución de un túnel mediante tuneladora o mediante excavación a cielo abierto se llevará a cabo en un tramo de la línea 9 de Barcelona situada en la Zona Franca de esta ciudad (tramo 2). Este sector de línea L9 (ejecutado en la actualidad) se ha realizado mediante una infraestructura en viaducto e incluye las estaciones de Zona Franca Litoral, Zona Franca Port, Zona Franca ZAL, Zona Franca i Polígon Pratenc. Se ha escogido este tramo con el fin de analizar una alternativa diferente a la ejecutada y con una geología y geotecnia constante que permite unas soluciones uniformes para el conjunto del tramo considerado.

Para el análisis de las alternativas se ha recopilado distinta información sobre la zona. La información geotécnica recopilada procede de los sondeos y parámetros geotécnicos establecidos para la realización del proyecto constructivo de la L9 en el tramo estudiado. A partir de los datos recopilados se ha procedido al estudio de ambas alternativas. La alternativa de excavación del túnel mediante tuneladora se ha llevado a cabo mediante una herramienta desarrollada en una tesina anterior de la escuela. Dicha herramienta permite estimar el presupuesto y el plazo de ejecución de dicha alternativa. En el caso de la alternativa a cielo abierto se ha realizado un cálculo para el dimensionado de la solución de contención del terreno. Posteriormente se ha desarrollado el presupuesto de esta solución y se ha analizado el plazo de ejecución de la misma.

### 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESINA

La tesina se encuentra estructurada en seis capítulos en los que se desarrolla y describe el conjunto de los trabajos realizados. De ellos, el presente **capítulo uno** integra el marco general de los trabajos, los objetivos generales y específicos y la estructura de la memoria.

El **capítulo dos** presenta un recopilación del estado del conocimiento relacionadas con la tecnología de excavación de túneles en entornos urbanos que se consideran en la presente toma de decisión (tuneladora y excavación a cielo abierto). El capítulo contiene en segundo lugar una descripción del tramo donde se llevará a cabo la aplicación del análisis de alternativas así como las consideraciones relacionadas con la aplicación de cada una de las alternativas consideradas para dicho tramo.

En el **capítulo tres** se analizan las diferentes metodologías y las diferentes clasificaciones de la toma de decisiones mediante un análisis basado en un enfoque multicriterio. En el capítulo se realiza una revisión de las herramientas existentes para este tipo de toma de decisión así como una justificación del empleo de la metodología MIVES una vez presentadas las diferentes metodologías existentes.

El **capítulo cuatro** incluye la definición y análisis de las variables que han sido elegidas en la metodología desarrollada en el capítulo anterior. En el capítulo se realiza una definición del árbol de requerimientos que corresponden a la herramienta que nos servirá para evaluar las alternativas de ejecución del túnel así como la descripción y definición de cada una de las funciones de valor que conforman dicho árbol de requerimientos.

En el **capítulo cinco** se recoge la aplicación de la metodología y la estructura de decisión construida a las dos alternativas consideradas para la ejecución de un túnel con tuneladora o a cielo abierto. Esta aplicación práctica del análisis multicriterio desarrollado corresponde a una aplicación simplificada en que se realizan estimaciones de los parámetros considerados a partir de los datos e información disponible en el momento de realización de la presente tesina.

El **capítulo seis** incluye un resumen con las conclusiones principales y ofrece una visión general del desarrollo de la tesina. De forma adicional se incluyen unas recomendaciones respecto a las futuras líneas de investigación y desarrollo relacionadas con los trabajos de la presente tesina.

## 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se lleva a cabo en primer lugar una descripción de las tecnologías consideradas para la excavación de túneles en entornos urbanos que se han considerado en la presente toma de decisión. Tal y como se ha descrito en el apartado de introducción los métodos de construcción para un túnel urbano que se han considerado corresponden a la ejecución del mismo mediante tuneladora (TBM) o a cielo abierto.

El capítulo contiene en segundo lugar una descripción del tramo donde se llevará a cabo la aplicación del análisis de alternativas así como una serie de consideraciones relacionadas con la aplicación de cada una de las alternativas consideradas para el tramo en cuestión.

### 2.2. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

Tal y como se ha descrito en el apartado de introducción los métodos de construcción para un túnel urbano que se han considerado corresponden a la ejecución del mismo mediante tuneladora (TBM) o a cielo abierto. En los siguientes apartados se describen los dos sistemas considerados.

### 2.2.1. Tuneladora (TBM)

Las máquinas tuneladoras (En inglés Tunnel Boring Machine o TBM) corresponden a máquinas diseñadas especialmente para excavar a sección completa y soportar el terreno excavado a la vez que mantienen fuera del túnel el agua freática mientras este se encuentra en excavación.

El sistema permite el montaje seguro de un revestimiento estanco completo del túnel desde dentro de los límites de la máquina. A la vez que el terreno es excavado se emplaza en caso necesario un anillo completo formado por elementos de hormigón armado. La máquina tuneladora se empuja luego a sí misma hacia delante a través de gatos hidráulicos que se apoyan en el anillo completado o contra el terreno.

En la parte posterior de los equipos de excavación y avance se dispone un conjunto de plataformas que se desplazan con la propia máquina y se apoyan sobre rieles en las que se encuentran equipos auxiliares como transformadores, ventilación, depósitos de materiales y el sistema de evacuación del material excavado. Este equipo de rezaga que da soporte al sistema de excavación se denomina con el término inglés “back-up”.

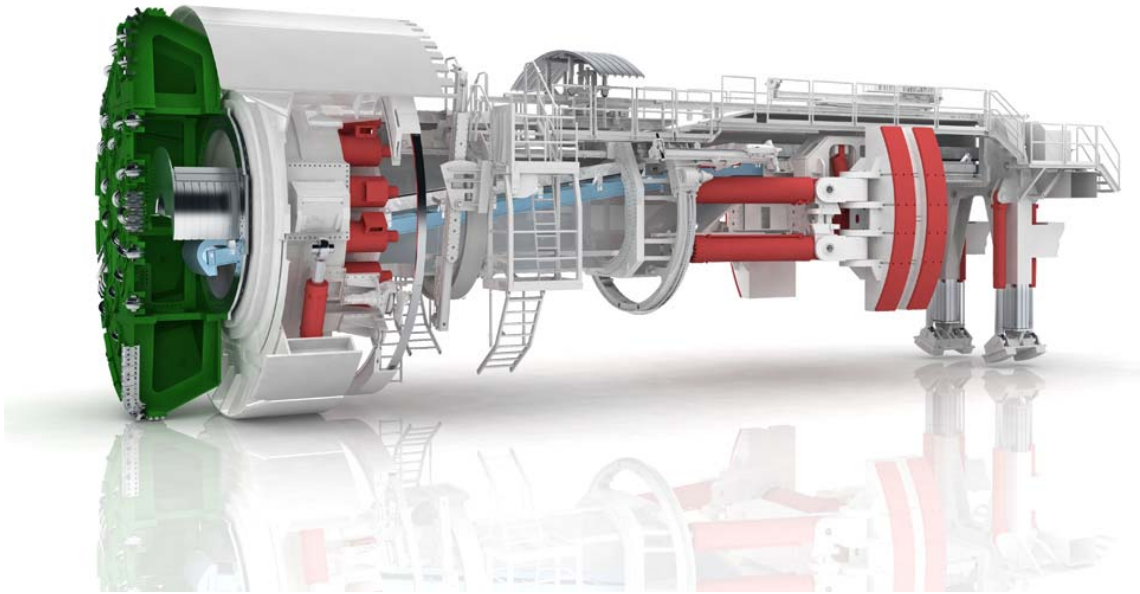
El sistema de excavación mediante tuneladoras de cabezal giratorio presenta como característica principal unos rendimientos muy elevados comparados con otros métodos de excavación de túneles. Por el contrario el método requiere de inversiones en tiempo y dinero elevadas de manera que sólo se justifica en caso de una longitud mínima del túnel. Otro condicionante que presenta la ejecución del túnel a excavar corresponde al trazado en planta ya que se requieren radios de curvatura elevados porque las máquinas no aceptan curvas cerradas. Finalmente hay que señalar que en el caso de excavar el túnel mediante tuneladora con cabeza giratoria la sección tendrá que ser circular.

Los principales tipos de tuneladoras corresponden a los topos y los escudos aunque existen tuneladoras de tipo mixto.

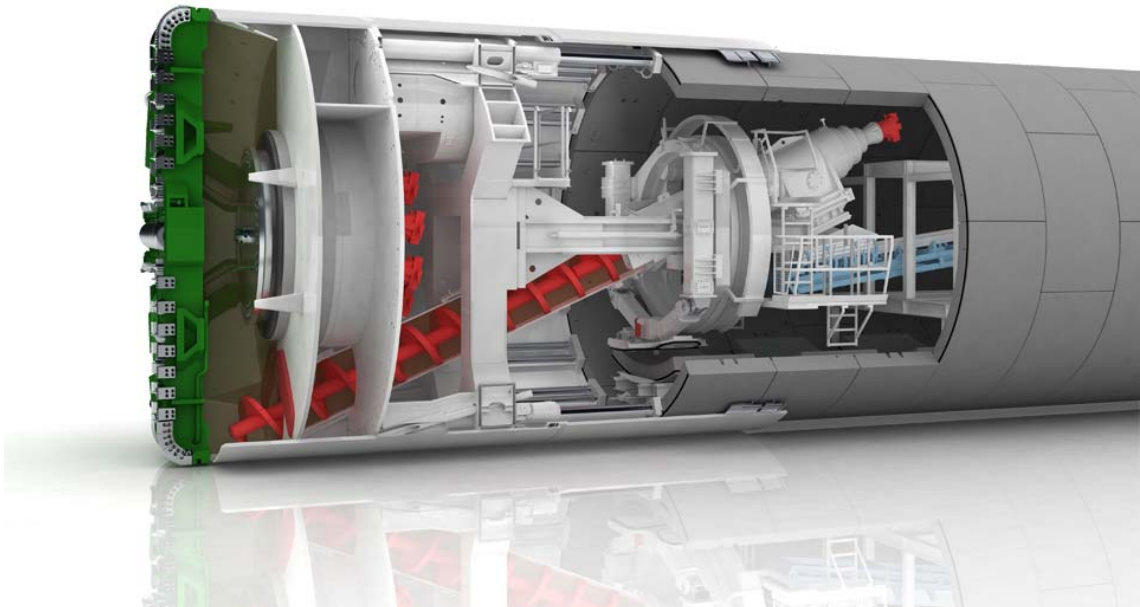
- Los topos son tuneladoras que se diseñan para excavar en rocas duras o medias (Ver Figura 2.1). Su principal característica corresponde a que no disponen de un cilindro de acero tras la rueda de corte con el fin de realizar la entibación provisional del terreno. El apoyo lateral contra el terreno para el empuje y avance de la tuneladora se realiza mediante zapatas móviles accionadas por gatos hidráulicos que las empujan contra la pared del túnel, de forma que se obtiene un punto fijo desde donde empujarán.
- Los escudos por su parte corresponden a tuneladoras que se utilizan en la excavación de rocas blandas y suelos (Ver Figura 2.2), es decir en terrenos que necesitan de sistemas de sostenimiento para evitar el colapso del hueco excavado. Estos últimos poseen una carcasa metálica exterior que sostiene de manera provisional el terreno



desde el frente hasta la zona de colocación del sostenimiento definitivo que normalmente se encuentra formado por un anillo de dovelas.



**Figura 2.1:** Vista de una TBM para roca tipo Topo (imagen cortesía de Herrenknecht AG).



**Figura 2.2:** Vista de una TBM para suelo y roca blanda tipo EPB (imagen cortesía de Herrenknecht AG).

Proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con TBM o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio

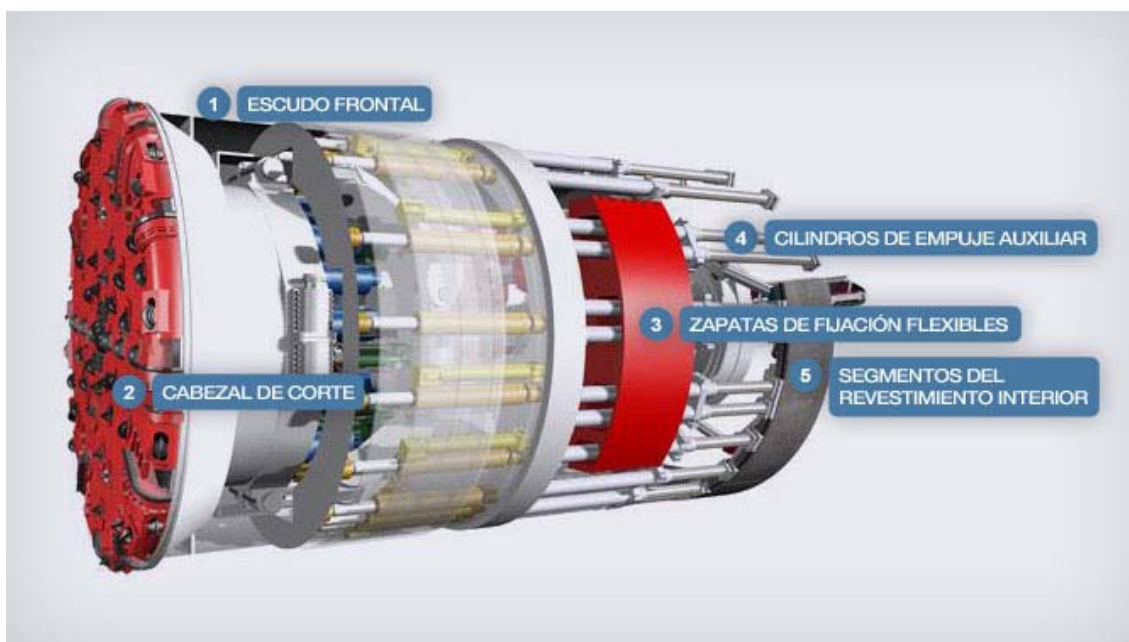
El cabezal giratorio de las tuneladoras se encuentra equipado con picas, “rippers” (elementos de arranque del suelo y cortadores (elementos que rompen la roca por indentación). En el cabezal se encuentran asimismo una serie de aperturas por las que el material arrancado entra a una cámara desde la que es evacuado hacia el exterior de la máquina.

Dentro de los escudos podemos distinguir dos grandes grupos en función de la estabilidad del frente (frente abierto o frente cerrado). Estos últimos a su vez se clasifican en función de su tipología:

- **Escudos de frente abierto:** este tipo de escudos se emplean cuando el frente del túnel se presenta estable a la excavación. En esta tipología de escudos la excavación puede ser manual, mediante fresado, brazo de excavación o cabezal giratorio. Las primeras opciones permiten secciones finales de excavación no circulares.
- **Escudos de frente cerrado:** que se emplean en el caso de frentes de túnel inestables como terrenos no cohesivos con presencia de agua. Dentro de este grupo diferenciamos a su vez varios tipos:
  - **Escudos de cierre mecánico:** en este caso la entrada del material se regula mediante puertas de apertura controladas de forma hidráulica. Su uso es complicado con presencia de agua en el terreno.
  - **Escudos presurizados:** mediante aire comprimido. Hoy en día esta tipología de escudos se encuentran en desuso.
  - **Escudos de bentonita:** denominados también hidroescudos. En estos mediante la inyección de bentonita conseguimos estabilizar el frente del terreno y su posterior bombeo.
  - **Escudos de balance de presión de tierras:** también conocidas como EPBs. En este caso el material se extrae de cámara mediante un tornillo de Arquímedes. Mediante la variación de la fuerza del empuje de avance y la velocidad de extracción de las tierras mediante el tornillo conseguimos controlar la presión de tierras para garantizar la estabilidad del frente de excavación. Con el fin de facilitar el buen comportamiento de los materiales procedentes de la excavación se añaden a estos productos químicos para aumentar su plasticidad. Se trata de la tipología que predomina en la actualidad para la excavación de túneles por debajo del nivel de agua.

Una tipología de tuneladora diferente a las citadas corresponde a los dobles escudos (Figura 2.3) que presentan la característica de que pueden trabajar como topo o como escudo en función de la calidad del terreno atravesado. El escudo en este caso se encuentra dividido en dos partes que pueden funcionar de manera independiente. Esta tipología se encuentra

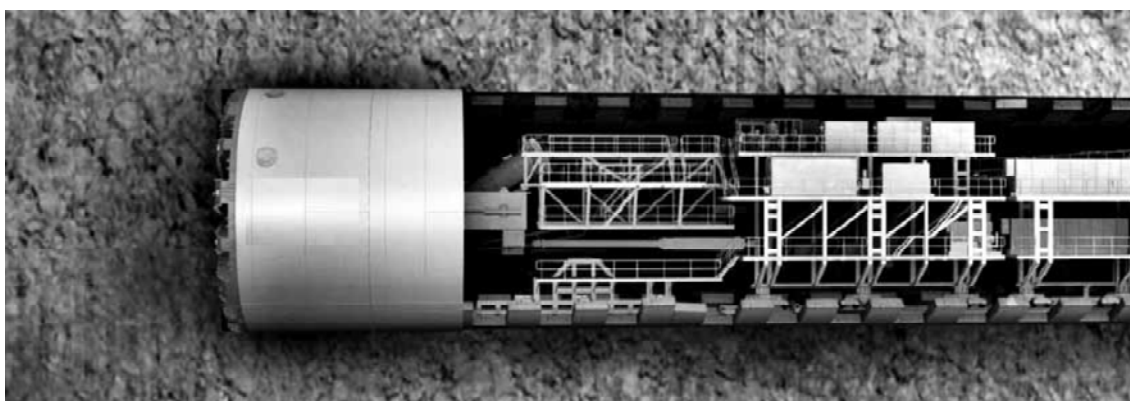
indicada en el caso de macizos de naturaleza variable que presentan comportamientos tanto de roca como de suelo.



**Figura 2.3:** Elementos que conforman una tuneladora de doble escudo (imagen procedente de [www.bioceanicoaconcagua.com](http://www.bioceanicoaconcagua.com)).

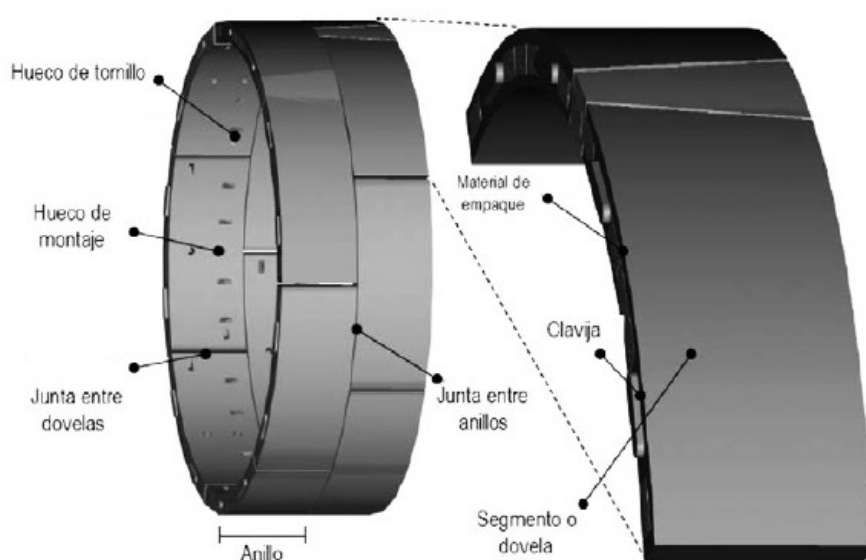
En este tipo de tuneladoras encontramos dos partes correspondientes a la cabeza de corte y la zona de montaje de los anillos de dovelas. En el caso de atravesar terrenos capaces de soportar la presión de los “grippers” de apoyo estos se fijan lo que permite empujar la cabeza de corte para realizar la excavación a la vez que por detrás de los grippers se continúa con las tareas de montaje de los anillos de dovelas del sostenimiento. En este modo de funcionamiento los rendimientos se incrementan respecto a un escudo simple. En el caso de que el terreno no permita el apoyo de los grippers la tuneladora funciona como un escudo simple.

Las tuneladoras corresponden a maquinaria de excavación con un uso contrastado que en las últimas décadas han experimentado un crecimiento progresivo en su empleo para la ejecución de túneles de grandes infraestructuras lineales (Ver Figura 2.4). Su empleo se adapta especialmente a entornos urbanos donde las restricciones de acceso al subsuelo por la presencia de edificaciones, estructuras y servicios en superficie condicionan en gran manera las posibilidades de elección de las diferentes opciones. Este factor, unido al elevado rendimiento en la excavación del túnel para un amplio rango de tipos de suelos, ha llevado a considerar esta tecnología con frecuencia como la opción elegida para proyectos de túneles urbanos.



**Figura 2.4:** *Sección de terreno con tuneladora excavando con disco de corte, cabeza con el escudo y tren de apoyo junto con el sostenimiento (imagen procedente de Seguridad en el trabajo con tuneladoras).*

Por detrás del avance de la tuneladora se dispone el sostenimiento definitivo que normalmente consiste en anillos formados por 7 dovelas garantizado de esta manera la estabilidad del túnel (Figura 2.5). Las piezas del anillo quedan fuertemente unidas mediante pernos mientras que las juntas longitudinales transversales entre anillos y longitudinales entre dovelas quedan estancas al disponer de elementos de neopreno entre ellos. La estanqueidad del anillo queda reforzada por la inyección que se realiza en el terreno del trasdós de las dovelas.



**Figura 2.5:** *Esquema de las partes básicas de un anillo de dovelas (Bloom, 2002).*

### 2.2.2. Cielo abierto

La excavación a cielo abierto de túneles corresponde a una práctica común de construcción de los mismos. El término inglés “cut and cover” (cortar y cubrir) refiere a la

metodología de construcción de túneles en la que realizamos desde la superficie la excavación del hueco que posteriormente será ocupado por el túnel, la posterior construcción del túnel a cielo abierto y el posterior cubrimiento del mismo una vez se ha terminado de realizar la estructura del futuro túnel. La excavación a cielo abierto requiere de sistemas de contención de las tierras para soportar los empujes de las mismas. De la misma forma la estructura del túnel debe de soportar las cargas de los materiales de cobertura del túnel.

Existen básicamente dos maneras diferentes de realizar el procedimiento de excavación a cielo abierto.

- Método **“bottom up”** en esta modalidad se realiza la excavación a cielo abierto de la totalidad del espacio que será ocupado por el futuro túnel. Los materiales que se emplean para la estructura del túnel son el hormigón armado o pretensado, acero o ladrillo.
- Método **“top down”** en este método se ejecutan desde la calle las paredes del túnel formada por muros pantalla. Una vez terminadas las paredes laterales se ejecuta la losa superior apoyada en las paredes laterales y hormigonada contra el terreno superior. Una vez finalizados estos procesos se procede a la continuación de los trabajos en el interior del túnel excavando por debajo de la losa ejecutada. Este proceso permite restablecer en superficie los servicios o sistemas interrumpidos de forma temporal mientras se continúa con los trabajos por debajo del nivel de la losa.

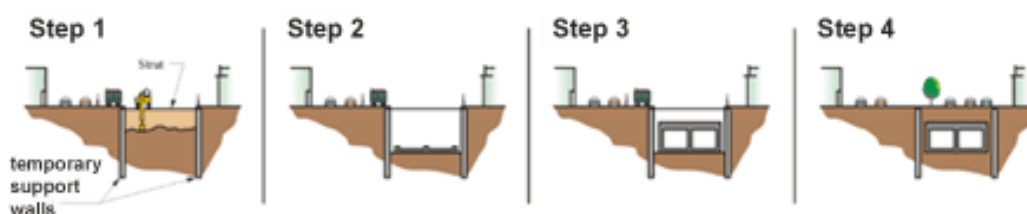


Figura 2.6: Método constructivo de túneles a cielo abierto Método “bottom-up” (imagen procedente de <http://www.railsystem.net>).

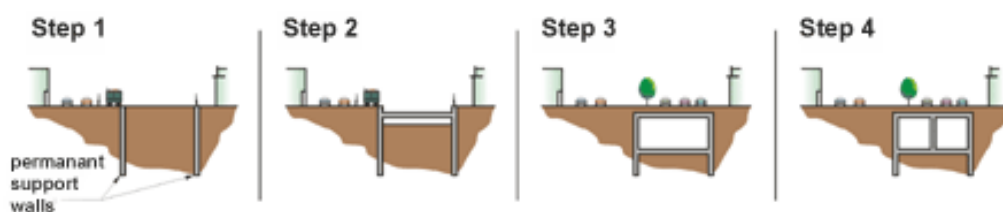


Figura 2.7: Método constructivo de túneles a cielo abierto Método “top-down” (imagen procedente de <http://www.railsystem.net>).

Los túneles poco profundos se ejecutan con frecuencia con excavación a cielo abierto (incluso en condiciones en que el tubo se dispone por debajo del nivel de agua) mientras que

los túneles profundos se excavan, de forma frecuente utilizando una tuneladora. Para profundidades intermedias, se hace posible utiliza ambos métodos.

Para la construcción de grandes estaciones subterráneas se emplea de forma frecuente excavaciones rectangulares a cielo abierto mediante pantallas de contención lateral. La principal desventaja que presenta el método de excavación a cielo abierto corresponde a la afectación que el método genera en superficie durante la construcción.

### 2.2.3. Comparación tuneladora y cielo abierto

En cualquier proyecto de construcción, los pros y contras necesitan ser considerados para determinar la solución más apropiada. Algunas de las características asociadas a las opciones de excavación de túneles a **cielo abierto** (cut-and-cover) y **TBM** se destacan a continuación:

#### a) Cielo abierto (cut-and-cover)

##### Ventajas:

- En el caso de líneas de doble sentido estas se pueden disponer en la misma estructura de contención. Ello implica beneficios por lo que respecta a los costes de construcción. Adicionalmente proporciona una evacuación fácil entre túneles adyacentes en caso de emergencia.
- Corresponde a un procedimiento constructivo de túneles estándar, de manera que la mayor parte de contratistas puede realizar el trabajo.
- Los túneles son relativamente poco profundos, de manera que los pozos de ventilación serán igualmente económicos de construir. La estructura de las estaciones serán también relativamente poco profundas.
- En las zonas donde actualmente no se encuentran emplazadas infraestructuras como sistemas de metro o tren subterráneo pero se sabe que se requieren estas (centro ciudades) se pueden implementar técnicas de excavación a cielo abierto relativamente económicas.

##### Desventajas:

- La construcción causa mayores afectaciones en superficie debido al desvío de los servicios existentes.
- La presencia de niveles freáticos elevados implica que sea necesaria una estructura pesada que resista las subpresiones. Además, la estructura necesitará ser impermeable para tener un túnel estanco.



- Las estructuras existentes a lo largo de la traza del nuevo túnel tendrán que ser desplazadas o eliminadas para la construcción del túnel.
- En el caso de presencia de otras obras a lo largo de la traza del túnel tienen que quedar en espera hasta la finalización del mismo. De esta manera el túnel corresponde al camino crítico en muchos de estos proyectos lo que puede dar lugar a peticiones de indemnizaciones por retrasos en otros contratos.
- La construcción del túnel mediante excavación a cielo abierto tendrá que proporcionar un túnel de tamaño suficiente con el fin de atender las futuras necesidades de ampliaciones de las líneas de metro o ferrocarril.

**b) Tuneladora (TBM)**

Ventajas:

- Los túneles son relativamente profundos y por ello se dará poca o ninguna interacción con la superficie durante la construcción.
- No se requieren desvíos de servicios excepto en los pozos de ataque y recepción de las tuneladoras.
- La mayoría de las infraestructuras existentes se mantendrán, siendo poca o nula la demolición necesaria de estas.
- No se prevén retrasos para los contratistas que trabajan en otras infraestructuras, proporcionando una ruta predecible.
- Los túneles se definen para las necesidades actuales del sistema, por lo que no se suelen sobredimensionar.

Desventajas:

- Se requiere la perforación de dos túneles separados en el caso de un trazado con doble sentido. Esta desventaja puede llegar a obviarse en el caso de secciones circulares que puedan contener ambos sentidos de circulación como en el caso de los túnel de L9 de Barcelona.
- Los túneles serán más profundos que en el caso de la opción de túnel mediante excavación a cielo abierto de manera que los recintos de estación deberán ser más profundos.
- Será necesario construir pasajes de conexión entre los tubos a efectos de evacuaciones de emergencia.
- Para los trabajos de túnel será necesario contratar contratista especialistas en la ejecución mediante tuneladoras.

#### 2.2.4. Cuestiones que deben abordarse en la evaluación del método preferido de construcción

Las principales consideraciones en la determinación del método más apropiado para la construcción de túneles para los diferentes sistemas incluyen una combinación de aspectos técnicos, logísticos y económicos. Estos tendrán que ser abordados de manera breve en una primera aproximación, pero tendrá que llevarse a cabo con mayor rigor en la investigación a medida que se disponga de más información definitiva del proyecto.

##### Consideraciones técnicas:

- ¿Son las condiciones del terreno apropiadas para los túneles a perforar especialmente respecto a las cavidades subterráneas actuales? ¿Qué información existe de las condiciones del terreno? ¿Se han formado los pozos a la profundidad adecuada?
- Pueden las tuneladoras ser diseñadas para hacer frente a las posibles condiciones de abrasión de arenas y una posición elevada de las aguas subterráneas?
- ¿Pueden los túneles ser construidos bajo las carreteras e infraestructuras existentes?

##### Consideraciones logísticas:

- ¿Puede aplazarse la ejecución de los túneles hasta después de la inauguración de otros proyectos?
- ¿Los contratistas de la zona están suficientemente experimentados en los sistemas constructivos?

##### Consideraciones económicas:

- ¿Cuál es el coste adicional de dos perforaciones separadas comparadas con una única estructura con varios espacios? ¿Cuáles son los costes adicionales de las galerías de emergencia entre tubos?
- ¿Cuál es la base de la estimación de costes para túneles perforados, teniendo en cuenta la existencia o falta de proyectos similares en la zona?
- ¿En cuál de las opciones de túnel excavado es probable que sean más profundos los recintos de las estaciones?, sin embargo, ¿Cuáles presentan ventajas para el movimiento de pasajeros y a efectos de ventilación una vez completadas las instalaciones?
- ¿Cuáles son los costes reales de los servicios públicos?



- ¿Pueden los retrasos en la construcción de otros proyectos afectar al coste del presente proyecto si los contratistas o desarrolladores consideran que se está produciendo un impacto en sus obras?

### 2.3. TRAMO DE ANÁLISIS DE LA ZONA FRANCA DE BARCELONA

El análisis de alternativas para la ejecución de un túnel mediante tuneladora o mediante excavación a cielo abierto se llevará a cabo en un tramo de la línea 9 de Barcelona situada en la Zona Franca de esta ciudad. Ver trazado de esta línea en la Figura 2.8.



Figura 2.8: Características, tramos y estaciones de la L9 de Barcelona (Fuente: Infraestructures.cat).

La L9 de Barcelona corresponde a un proyecto que se remonta al año 1997 cuando aparece por primera vez recogida en el PDI (Pla Director d'Infraestructures). Esta línea ferroviaria es una infraestructura por donde transcurren principalmente los servicios de las líneas 9 y 10 de TMB y en un futuro también la línea 2. En los proyectos constructivos aparece como una sola infraestructura o línea llamada línea 9 (L9) y la distinción entre L9 y L10 no aparece hasta la planificación del servicio por parte del operador, Transportes Metropolitanos de Barcelona (TMB)

Se trata de la inversión más grande que el Gobierno de Cataluña ha emprendido hasta el momento que se encontraba dentro del Plan director de Infraestructuras 2001-2010 (Pla

director d'Infraestructures 2001-2010), aprobado por la Autoridad del Transporte Metropolitano el 25 de abril de 2002. Se prevé que tenga una utilización media de 120 millones de usuarios anuales una vez finalizada.

La línea 9 del Metro de Barcelona es una línea automática de ferrocarril metropolitano subterráneo que actualmente tiene 24 estaciones en funcionamiento. Cuando finalice su construcción, con 47,8 km de longitud y subterránea en 43,71 km.

La construcción de la línea se ha visto afectada desde un inicio por retrasos y constantes revisiones de presupuesto al alza que finalmente con la crisis económica y la falta de financiación para afrontar las obras han desembocado en una paralización actual de los trabajos de construcción y de perforación realizados mediante tuneladoras quedando pendiente buena parte del tramo 3 del túnel principal y de las estaciones de este tramo para poder finalizar las obras. La situación actual no permite vislumbrar la fecha de finalización de la línea en su conjunto.

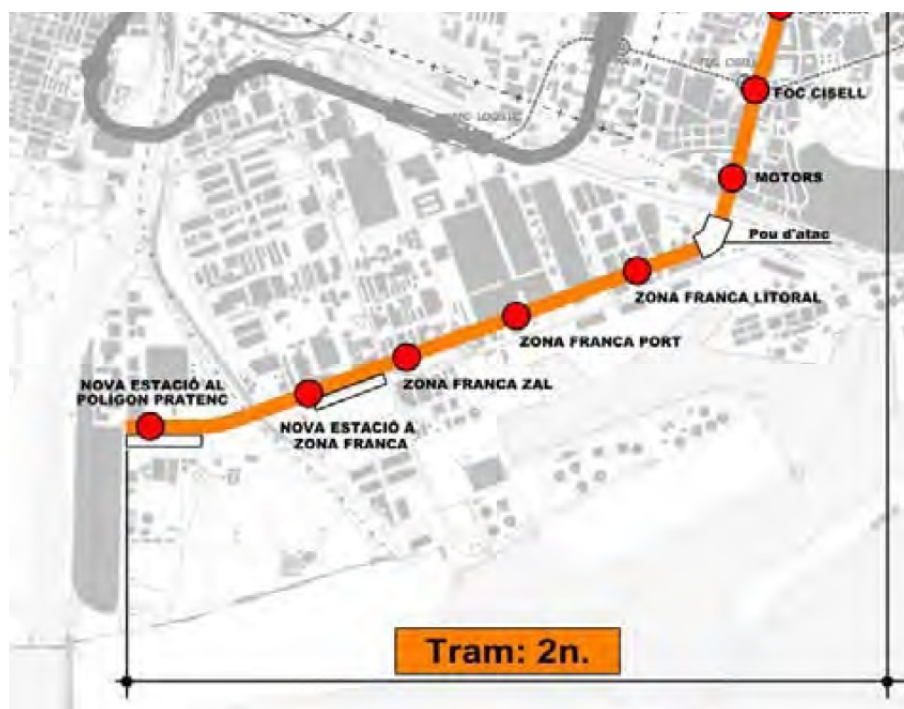
### 2.3.1. Tramo analizado

El tramo analizado corresponde a un sector de la línea 9 del metro de Barcelona denominado tramo 2 situada en la Zona Franca de dicha ciudad. Este sector del tramo 2 de línea L9 se ha realizado mediante una infraestructura en viaducto e incluye las estaciones de Zona Franca Litoral, Zona Franca Port, Zona Franca ZAL, Zona Franca i Polígon Pratenc. En la actualidad el tramo de metro en viaducto se encuentra ejecutado a lo largo de la calle A de la Zona franca entre el pozo de ataque y la estación Zona Franca donde se encuentran las cocheras de TMB de final de línea.

Se ha escogido este tramo con el fin de analizar una alternativa diferente a la ejecutada y que nos permita aplicar el análisis de las dos opciones consideradas en la presente tesina (excavación del túnel mediante tuneladora y excavación del mismo a cielo abierto).

El tramo presenta una geología y geotecnia constante que permite unas soluciones uniformes para el conjunto del tramo considerado. El tramo cumple además con el requerimiento de que se trata de un tramo en entorno urbano, a pesar de que se trata de una zona industrial y de servicios.

En la Figura 2.9 se pueden apreciar las estaciones que se encuentran en la zona de estudio.



**Figura 2.9:** Estaciones del tramo 2 de la Línea 9 en el sector de la Zona Franca (Fuente: *Infrestructures.cat*).

La Figura 2.10 corresponde a la ortofoto de la zona de estudio que en la actualidad presenta el tramo de L9 ejecutado en viaducto. La longitud del tramo analizado es de 3 km con 4 estaciones de 100 m de longitud intercalados. De esta manera el tramo de túnel entre estaciones presenta una longitud total de 2,6 km.



**Figura 2.10:** Ortofoto de la zona donde se ubica el tramo 2 de la línea 9 en el sector de la Zona Franca de Barcelona construida en viaducto (Fuente: *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya ICGC*).

Proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con TBM o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio

### 2.3.2. Geología y geotecnia de la zona

La ciudad de Barcelona se encuentra situada desde el punto de vista geológico en un marco extensivo que afecta desde los tiempos neógenos la zona del margen occidental del mar catalanobaleár. El proceso tectónico implica la presencia de una serie de fallas normales de disposición aproximadamente paralelas a la línea de costa que individualizan una serie de bloques hundidos (fosas o semifosas tectónicas) que se disponen entre otros bloques relativamente más elevados (horts). Ejemplos de los primeros serían la fosa del Vallès y la fosa de Barcelona mientras que la Serra de Collserola sería un ejemplo de los segundos. Estos bloques en la actualidad se encuentran recubiertos por sedimentos cuaternarios que ocultan parcialmente su morfología.

En el margen del área emergida se dispone otro bloque elevado que conforma la elevación del Montjuïc, que queda cortado por otra falla normal en la zona del Morrot. Otra falla normal paralela a la costa da paso a una importante fosa submarina conocida como fosa de Barcelona. Los bloques escalados dan lugar a que los materiales del substrato de edad paleozoica y mesozoica de la Serralada Litoral se hundan de forma progresiva hacia el mar de forma que quedan recubiertos por espesores importantes de sedimentos de edad cenozoica.

Desde el punto de vista litológico los materiales más antiguos de la zona corresponden a las rocas metasedimentarias paleozoicas (pizarras filitas y otras rocas) que afloran en Collserola. Estos materiales se encuentran afectados por un metamorfismo de contacto que se asocia a las intrusiones graníticas que afloran al pie de la montaña (Noreste del Besòs, Horta y Sarrià).

En la zona de los turons de la Rovira se emplazan asimismo materiales de edad Paleozoica con presencia de materiales de casi todos los períodos de esta era y litologías variadas. Estos resaltes positivos se encuentran separados de Collserola por una fractura de dirección NESW. Otras fracturas subparalelas a esta en la vertiente marítima hunden el substrato paleozoico de manera que este queda recubierto por sedimentos terciarios representados por margas y areniscas del bloque de Montjuïc y por las margas y arenas marinas de edad pliocena.

En la zona del piedemonte de Barcelona se dispone un conjunto de sedimentos de forma discordante sobre los materiales más antiguos. Se trata de depósitos de origen coluvial y edad pleistocena (Cuaternario antiguo) formados por arcillas, limos y costras calcáreas conocida como “Tricicle” al tratarse de tres niveles que se repiten hasta tres veces.

Los deltas del Besòs y del Llobregat corresponden a los niveles de materiales de edad muy reciente que se han formado durante el Holoceno (Cuaternario reciente posterior al periodo posterior a la última gran glaciación hace unos 15.000 años). Se trata de sedimentos de delta formados por limos y arcillas de las llanuras de inundación, arcillas de las marismas

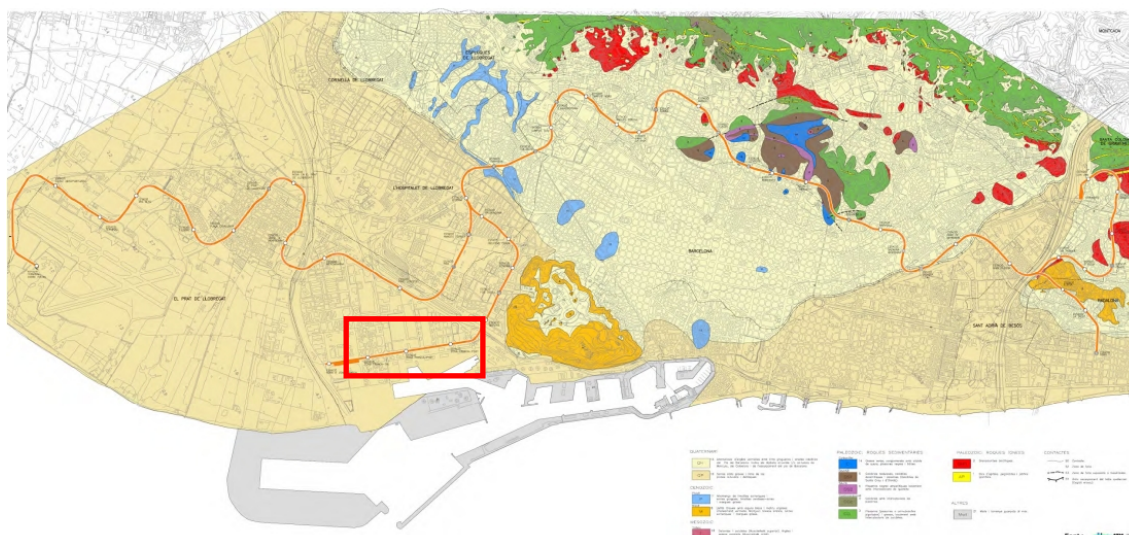


asociadas a los deltas, arenas y gravas de origen fluvial y arcillas y limos sedimentados en el frente deltaico y arenas litorales de playa.

A modo de resumen podemos indicar que el subsuelo de Barcelona se encuentra constituido por el substrato rocoso de los macizos de Collserola y los Serrats de la Rovira, los sedimentos miocenos de Montjuïc y de Badalona, las margas y arenas Pliocena que se encuentran recubiertas por formaciones superficiales de edad cuaternaria, integradas por la planicie de piedemonte del Llano de Barcelona y los deltas de los ríos. Dentro de este marco geológico la zona de estudio se encuentra en su totalidad enmarcada por los depósitos cuaternarios asociados al Delta del Rio Llobregat.

#### Características de la Línea 9

#### Plano geológico de la depresión de Barcelona



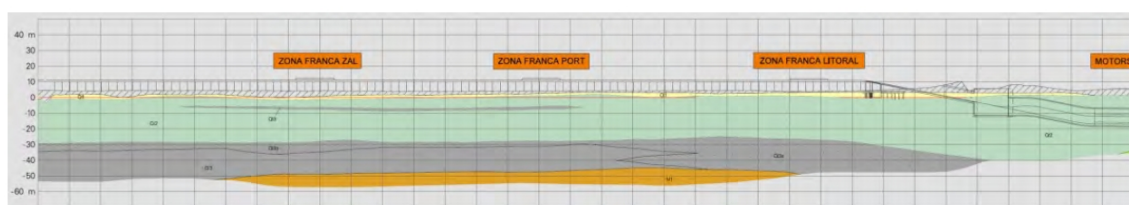
**Figura 2.11: Plano geológico de la depresión de Barcelona con indicación del trazado de la L9 y del sector en estudio de la Zona Franca (Fuente Infraestructures.cat).**

En la Figura 2.11 se pueden apreciar a grandes rasgos las principales unidades geológicas que se encuentran presentes en el subsuelo del área de Barcelona. Desde el punto de vista geotécnico la zona se presenta uniforme y formada en su totalidad por depósitos cuaternarios asociados al Delta del Llobregat. Los depósitos deltaicos forman un esquema litológico que de muro a techo es el siguiente:

- *Nivel aluvial inferior*, de 5-10 m de potencia que se encuentra formado por gravas rodadas y arenas con gravas de origen fluvial (acuífero cautivo profundo).

- *Nivel intermedio*, de sedimentos de prodelta (cuña impermeable) constituidos por arcillas y limos, limos arenosos y arenas finas o limosas, generalmente grises. Se acuña aguas arriba y lateralmente.
- *Nivel detrítico superior*, formado por arenas medias y gruesas, bastante limpias de sedimentación fluviodeltaica y litoral (acuífero superior).
- *Nivel superficial*, formado por arcillas y limos de llanura de inundación deltaica. Pueden albergar sedimentos de arcillas grises con restos orgánicos de marismas asociadas al proceso deltáico.

En la Figura 2.12 se presenta un perfil geológico de la zona correspondiente al tramo 2 de línea 9 de la Zona Franca en la zona considerada en estudio.



**Figura 2.12: Perfil geotécnico del tramo 2 de la línea 9 en la zona de estudio entre el pozo de acceso y las estaciones de la Zona Franca (Fuente: Infraestructures.cat).**

La información geotécnica recopilada procede de los sondeos y parámetros geotécnicos establecidos para la realización del proyecto constructivo de la L9 en la zona.

En nuestro caso los materiales que encontramos y que afectan a la infraestructura prevista corresponden a un nivel de rellenos antrópicos (denominada Ra en L9) al nivel superficial (denominada Q<sub>i1</sub>) y al nivel detrítico superior de arenas medias y gruesas (denominada Q<sub>i2</sub>). Las unidades geotécnicas que se diferenciaron durante el proyecto y construcción de la línea 9 en la zona así como los parámetros geotécnicos asociados se presentan en la tabla 2.1.

Nivel geotécnico	Peso específico natural $\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	Peso específico seco $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión efectiva $c'$ (kPa)	Ángulo de rozamiento efectivo $\phi'$ (°)	Cohesión no drenada $c_u$ (kPa)	Módulo de deformación (MPa)
Ra	20,0	17,5	10	30	-	5,0
Q <sub>i1</sub>	20,0	17,0	25	29	35	15,0
Q <sub>i2</sub>	20,0	17,0	10	30	-	20,0
Q <sub>i3</sub>	20,0	17,0	25	29	35	15,0

**Tabla 2.1: Parámetros geotécnicos de cada una de las unidades diferenciadas en el proyecto de L9 (Fuente: Infraestructures.cat).**

Se han recopilado los sondeos realizados en la zona con el fin de establecer la columna tipo del terreno a considerar en los cálculos posteriores. Los sondeos consultados (facilitados por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya) de la zona del trazado han sido el SRB-2, SIT-36, SIT-37, SIT-38, SIT-39, SIT-40, SIT-41, SIT-42 y SIT-43. Estos sondeos se disponen alienados a lo largo del trazado de la línea 9 en la zona estudiada.

La columna tipo considerada a partir de la información procedente de estos sondeos es de un primer nivel de tierras de rellenos (nivel geotécnico  $R_a$ ) de 2,0 m de espesor por debajo del cual se dispone 1,0 m de espesor de limos y arcillas orgánicas (nivel geotécnico  $Q_{11}$ ) al que siguen las arenas y gravas del complejo detrítico superior (nivel geotécnico  $Q_{12}$ ) hasta una profundidad de 35 m.

Por debajo del complejo detrítico superior se encontrarían los materiales de la cuña intermedia (nivel geotécnico  $Q_{13}$ ) hasta una profundidad mínima de 50 m. El nivel freático se sitúa a una profundidad de 3,0 m en el límite entre los niveles  $Q_{11}$  y  $Q_{12}$ . La cota topográfica del terreno actual en la zona se encuentra situada a una cota de +4,0 msnm (metros sobre el nivel de mar) por lo que el nivel freático se encuentra situado a una cota de +1,0 msnm.

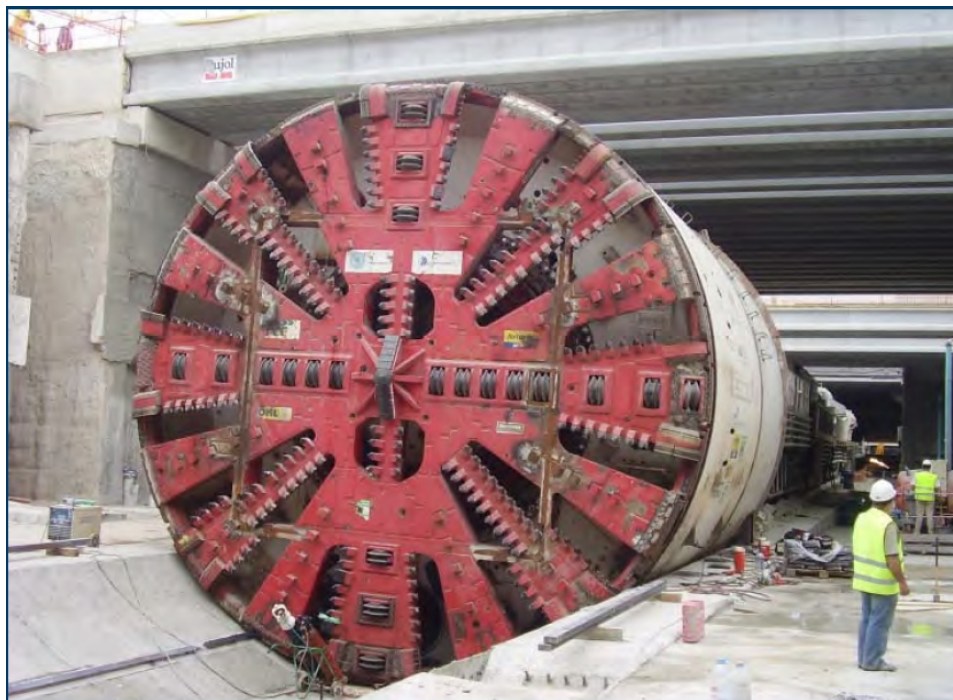
## 2.4. ALTERNATIVAS CONSIDERADAS

Para llevar a cabo el análisis de alternativas se han considerado las dos alternativas correspondientes a la ejecución del túnel mediante tuneladora y a la ejecución del túnel en excavación a cielo abierto. En los siguientes apartados se especifican las consideraciones llevadas a cabo en cada uno de ambos casos para llevar a cabo, con posterioridad, el análisis de cada una de las alternativas.

### 2.4.1. Alternativa con tuneladora

En el tramo de L9 elegido se ha considerado en este caso a partir de la experiencia del túnel de L9 una ejecución para el tramo analizado mediante una tuneladora de 9,4 m de diámetro exterior que permite una excavación de la sección completa para el paso de los convoyes en ambos sentidos. Esta configuración permite alojar la doble vía a nivel y las pasarelas laterales para evacuación de pasajeros no siendo necesaria la disposición de galerías de evacuación entre los tramos de estaciones que se sitúan aproximadamente cada 650 m en esta zona.

Se ha considerado la sección del tubo situada a una profundidad de 20 m respecto del nivel medio de la calle en la zona (+4,0 msnm). El eje de la tuneladora de 9,4 m de diámetro quedaría situado por tanto a una profundidad de -16,0 msnm. En la Figura 2.13 se puede observar una de las tuneladoras de 9,4 m de diámetro empleadas en la construcción del tramo 1 de la L9 de Barcelona.



**Figura 2.13:** *Tuneladora tipo EPB de 9,4 m de diámetro empleada para la construcción del tramo 1 de la L9 de Barcelona (Fuente Infraestructures.cat).*

Para el análisis de la alternativa se ha considerado la utilización de resultados que provienen de el empleo de una herramienta desarrollada, en una hoja de Excel, en el marco de la tesina de Ignacio Sáenz de Santamaría Gatón (2007).

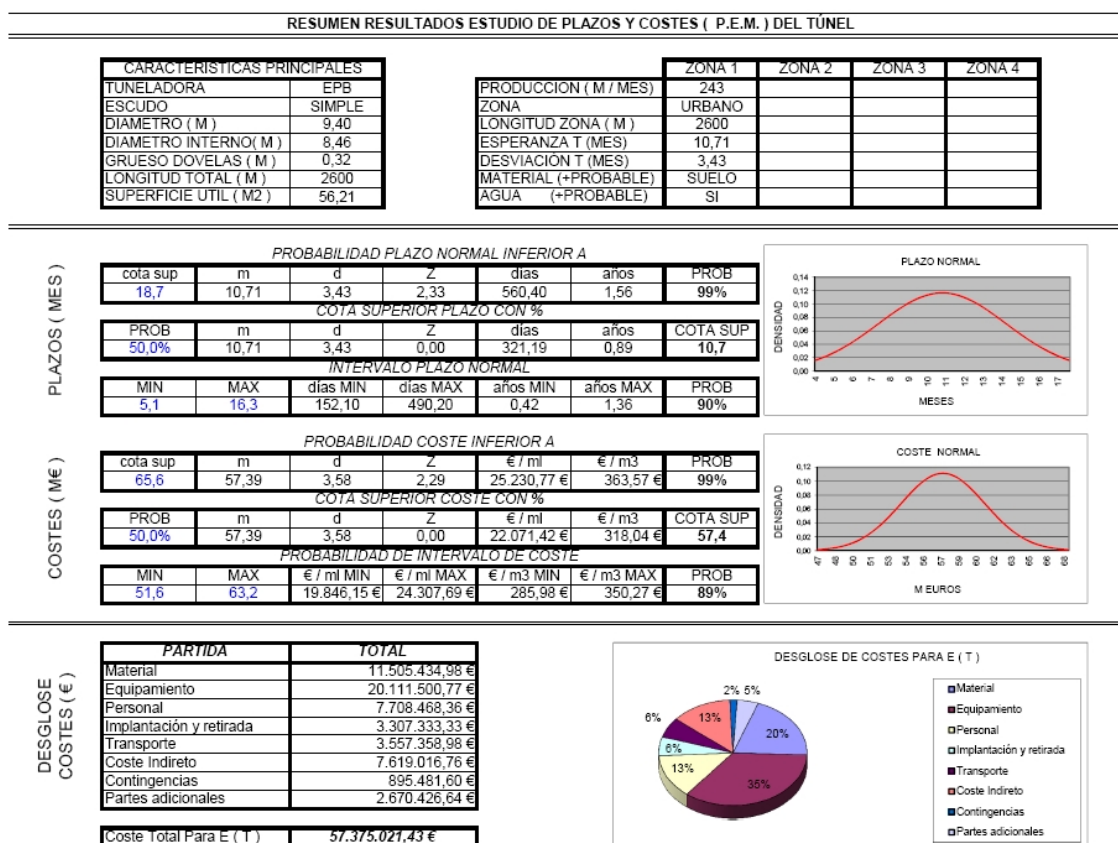
El objetivo de dicha tesina fue aportar una herramienta sencilla y de rápida aplicación que ayudara en la toma de decisiones en el diseño de túneles desarrollando un modelo para la valoración tanto del tiempo como del coste de construcción. Como paso previo al planteamiento del modelo, el autor llevó a cabo un estudio de los parámetros principales que se encuentran involucrados en la ejecución de un túnel mecanizado. El autor realizó asimismo un trabajo de documentación importante llegando a encontrar un total de 99 obras de entidad para ser consideradas en el trabajo. El enfoque del trabajo plantea una aproximación a la estimación del tiempo y del coste del proyecto basado en variables estocásticas, de forma que se expresa el coste como una curva de distribución normal, y poder determinar tanto el coste como el plazo de ejecución en forma de intervalos en base a la incertidumbre de los datos de entrada.

El resultado final es una hoja de cálculo en la que, una vez introducidos una serie de parámetros básicos que se consideran determinantes en su influencia para el coste y para el plazo de ejecución. Los resultados obtenidos se presentan en forma de salidas tanto gráficas como numéricas, y se encuentran basadas en distribuciones normales que definen tanto el plazo como el coste esperado de construcción.



Para analizar nuestro caso se ha partido de una serie de datos que corresponden a un tramo urbano ejecutado con una tuneladora de 9,4 m de diámetro y una longitud total de 2.600 m de túnel. La cobertura de la tuneladora se considera de 15 m y se excava en suelo con presencia de nivel de agua mediante tuneladora tipo EPB con escudo simple. Para los cálculos no se considera la pérdida de la tuneladora, un factor de rendimiento del 100%, una distancia al origen de la tuneladora (punto de fabricación) de 1.200 km y que no existe disponibilidad de fábrica de dovelas en la obra.

A partir de estos datos se ha procedido a llevar a cabo la estimación del coste y del plazo de ejecución para esta alternativa dando como resultado una tabla con tablas y salidas gráficas tal y como se recoge en la figura 2.14. Las hojas de los resultados del análisis realizado mediante la herramienta de Ignacio Sáenz de Santamaría Gatón se recogen en el anejo A al final del presente documento.



Para la consideración de los indicadores ambientales (cantidad de energía empleada, emisiones de CO<sub>2</sub>) se partió de la información medioambiental asociada procedente del banco de Infraestructuras.cat.

El resto de parámetros y valores considerados para la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora han sido establecidos en base a consideraciones basadas en datos bibliográficos, estimaciones así como en la experiencia del autor de la presente tesina. Los valores y su justificación para los indicadores considerados se recogen en los siguientes capítulos del presente estudio.

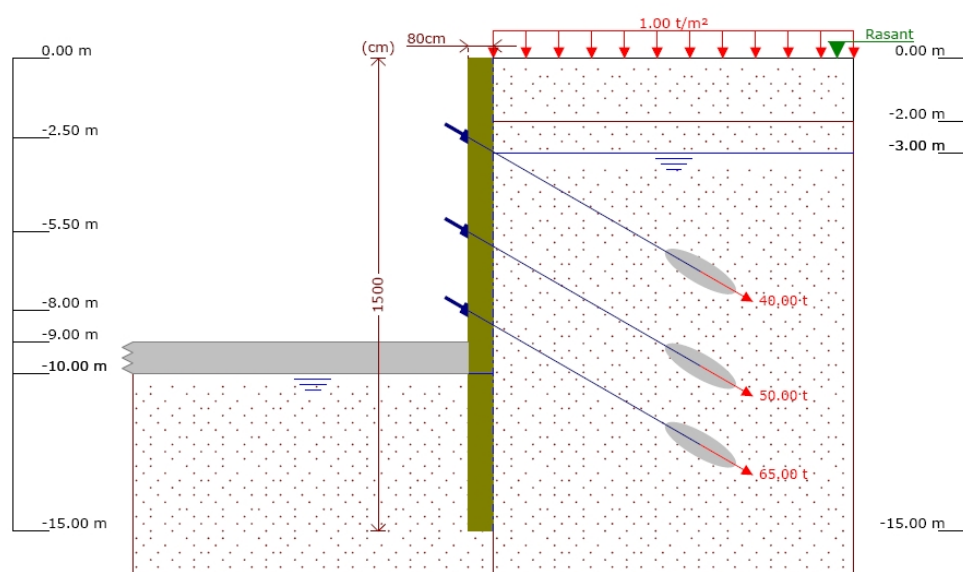
#### **2.4.2. Alternativa a cielo abierto**

En el caso de esta alternativa de excavación a cielo abierto se ha partido del análisis de una solución factible para la contención de tierras mediante pantallas ancladas. Se trata de buscar una solución de contención que sea válida desde el punto de vista constructivo para posteriormente hacer una estimación del coste y el plazo de ejecución de esta alternativa.

Para llevar a cabo el análisis se ha empleado la herramienta correspondiente al módulo de cálculo de muros pantalla del programa Cype. Este módulo se encuentra diseñado para el dimensionamiento y comprobación de muros pantalla de tipo genérico de cualquier material y de hormigón armado, con dimensionamiento de las armaduras.

Para realizar los cálculos se partió de la columna tipo del terreno y de los parámetros geotécnicos de las unidades geotécnicas diferenciadas (ver apartado anterior). Se dispuso asimismo el nivel freático a la profundidad señalada en el apartado anterior. Se consideró una sobrecarga uniforme de 1 t/m<sup>2</sup> en el terreno del trasdós de las pantallas. Se verificó también la situación final en servicio con la solera de fondo y la cubierta cerrando el recinto entre pantallas.

Tras una serie de tanteos finalmente se llegó a una solución de excavación de los recintos entre pantallas basada en pantallas de 0,8 m de espesor y 15 m de profundidad así como una contención mediante 3 niveles de anclajes. En la figura 2.15 se presenta un esquema de la situación temporal para el nivel máximo de excavación con los tres niveles de puntales considerados y la losa de fondo ejecutada.



**Figura 2.15:** Esquema de la sección tipo de pantallas consideradas para la fase de máxima excavación del recinto entre pantallas del cálculo realizado mediante el programa Cype pantallas.

Los resultados del cálculo (recogidos en el anejo B al final del presente documento) han permitido realizar una estimación de la solución a nivel de materiales empleados por esta opción (hormigón, acero,...).

A partir de la solución calculada se procedió a una estimación del coste de la solución de excavación del túnel a cielo abierto mediante un cálculo de las mediciones necesarias para esta solución y la confección de un presupuesto de ejecución material de la misma.

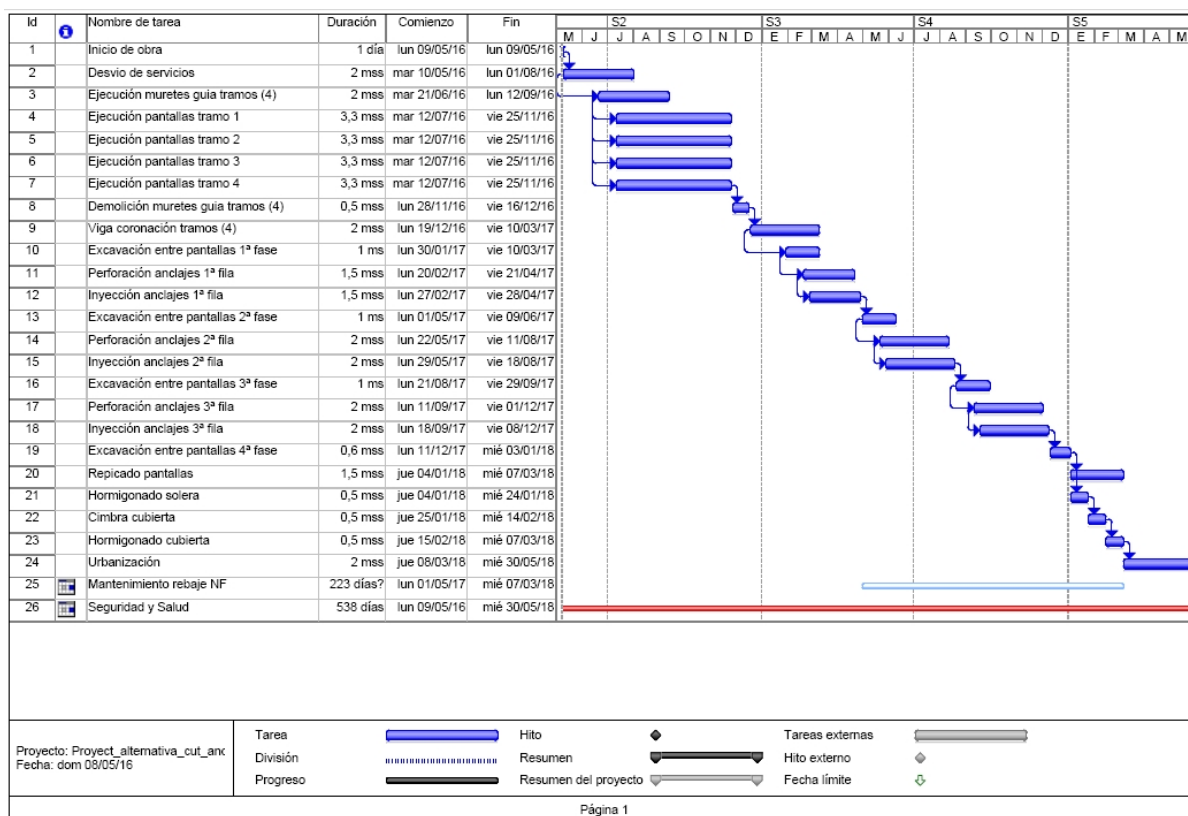
El presupuesto se realizó a partir del banco de precios de Infraestructures.cat que corresponde a la entidad que licita este tipo de infraestructuras en la zona de Barcelona. Para la confección del presupuesto se la alternativa se consideró unos costes indirectos del 5%.

Los principales capítulos del presupuesto corresponden a la ejecución de las pantallas y la excavación del terreno entre ellas hasta la cota considerada, la ejecución de la solera y la cubierta, la ejecución de los niveles de anclajes, el rebaja del nivel freático mediante pozos y diversas partidas alzadas que incluyen la seguridad y salud, la seguridad vial, el desvío de servicios o la reurbanización de la zona.

El resultado final de la confección del presupuesto fue de 59.287.361,03 € de presupuesto de ejecución material (P.E.M.). En el anejo C se recogen las mediciones, los precios empleados así como los resultados del presupuesto elaborado.

Para la estimación del plazo de ejecución de la presente alternativa se partió de los rendimientos y las mediciones de las principales actividades de la alternativa establecidos en el presupuesto para estimar los tiempos de ejecución de estas. Esta estimación se llevó a cabo en

base a una serie de suposiciones de equipos empleados en la ejecución de las obras. Finalmente se confeccionó un planning del conjunto de la obra para determinar el plazo total de ejecución para la alternativa de túnel excavado a cielo abierto. En la figura 2.16 se presenta el plan elaborado para esta alternativa; mientras que en el anejo D se recogen asimismo las estimaciones realizadas para establecer el mismo.



**Figura 2.16: Plan de obra de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto.**

Como en el caso anterior para la consideración de los indicadores ambientales (cantidad de energía empleada, emisiones de CO<sub>2</sub>) se partió de la información medioambiental asociada procedente del banco de Infraestructuras.cat.

Como en el caso de la solución anterior para la valoración del resto de indicadores considerados se han establecido en base a consideraciones basadas en datos bibliográficos, diversas estimaciones y en la experiencia del autor de la presente tesina. Los valores para los indicadores considerados se describen en los siguientes capítulos del presente estudio.

## 3. ANÁLISIS MULTICRITERIO

### 3.1. INTRODUCCIÓN

En la presente tesina se elabora un estudio para una toma de decisión utilizando la metodología MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles). En base a ello se realiza en primer lugar una revisión de las herramientas existentes para la toma de una decisión multicriterio.

La toma de decisión que se pretende estudiar corresponde a la ejecución de un túnel mediante tuneladora o mediante excavación a cielo abierto. Este proceso se realiza mediante el empleo de técnicas de análisis en que se consideran diferentes criterios para alcanzar una valoración de cada una de las alternativas consideradas.

Los aspectos analizados en el presente capítulo corresponden a las metodologías y las diferentes clasificaciones de la toma de decisiones basadas en este tipo de análisis. Se considera en primer término la nomenclatura empleada en la toma de decisión y la justificación del empleo de la metodología MIVES en la parte final del presente capítulo una vez presentadas las diferentes metodologías existentes.

### 3.2. TERMINOLOGIA ANÁLISIS MULTICRITERIO

El presente apartado presenta de forma previa la terminología utilizada en la toma de decisión multicriterio con el fin de servir de base para la comprensión del texto de la tesina. Los términos aparecen listados en orden alfabético.

Alternativa: cada una de las posibles soluciones al problema que se plantea en la toma de decisión.

Árbol de toma de decisión: En una toma de decisión corresponde a la estructura ordenada en forma de árbol que contiene los diferentes aspectos a considerar. Un árbol de decisión presenta un primer nivel de ramificación con aspectos generales denominados requerimientos. Este nivel se divide en un siguiente nivel intermedio de criterios. El último nivel procedente de la división de los anteriores corresponde a los aspectos que se van a valorar directamente denominados indicadores.

Asignación de pesos: Proceso por el que se estima la importancia relativa de cada uno de los aspectos considerados. Mediante este proceso se asigna de forma numérica a cada aspecto el grado de preferencia o de importancia de cada uno de los aspectos considerados.

Aspectos: Corresponden al conjunto de elementos que el decisor considera en el momento de la toma de decisión. Pueden estar ordenados en forma ramificada en los niveles de requerimientos, criterios y indicadores.

Aspectos considerados homogéneos: Grupo de aspectos que se engloban los elementos de una misma ramificación del árbol de requerimientos, por ejemplo el conjunto de indicadores que pertenecen al mismo criterio o el conjunto de criterios que pertenecen al mismo requerimiento.

Decisor: Se trata de la persona o grupo de personas que toma la decisión entre las diferentes alternativas.

Comparación de pares: Comparación que se realiza de la preferencia relativa que el decisor tiene de aspecto respecto de otro homogéneo. El proceso permite la construcción de una matriz de comparación por pares (de dimensión  $n \times n$  para  $n$  aspectos) a partir de los valores de comparación para cada par.

Cuantificación de los indicadores: Valores que adopta cada uno de los indicadores en función de la alternativa. Por ejemplo en el caso del plazo de ejecución de una alternativa la cuantificación podría ser en meses.

Función de valor: Función que permite obtener el valor de un indicador a partir de su cuantificación. El eje de abscisas corresponde a la variable del indicador en el rango establecido de cuantificación mientras que en el eje de ordenadas se presenta un valor entre 0 y 1 u otro rango. La función de valor permite conocer el índice de satisfacción del decisor con respecto a la cuantificación. En caso de incertidumbre la función se denomina función de utilidad asignando un función de probabilidad del valor al indicador.

Índice de valor de cada alternativa: Corresponde al valor global de cada una de las alternativas consideradas partir del valor del conjunto de los indicadores considerados en la toma de decisión. En el caso específico de la metodología MIVES este índice se obtiene a partir de los valores de los indicadores que se encuentran multiplicados por los correspondientes pesos en forma de cascada para cada uno de los niveles del árbol de decisión considerados. La obtención del índice de valor para cada una de las alternativas consideradas permite una ordenación de las mismas siendo la mejor la del valor más alto del índice.

Matriz de comparación por pares: Matriz en que se consignan las comparaciones por pares posibles a partir de la estimación relativa dentro de cada grupo de aspectos homogéneos. A partir de dicha matriz podemos obtener los pesos de cada uno de estos aspectos.

Peso: Valor que asignamos a cada uno de los aspectos respecto al resto de un grupo considerados homogéneos. Dentro de un grupo de aspectos que se consideren homogéneos la suma de los pesos tiene que ser igual a 1.

Pesos en cascada: Valor que se obtiene de multiplicar el peso de un indicador por el peso del criterio y del indicador al que pertenece este. El valor del indicador multiplicado por los pesos en cascada nos permite conocer el índice de valor de cada indicador para cada alternativa.

Tabla de valores de los indicadores para las alternativas estudiadas: Se trata de una tabla que contiene tantas filas como alternativas se han considerado y tantas columnas como indicadores valoradas. En la tabla se consignan los valores de los indicadores para cada una de las alternativas. Esta tabla se suele denominar matriz de decisión.

Toma de decisión monocriterio: Toma de decisión en que se considera únicamente un solo aspecto.

Toma de decisión multicriterio: Toma de decisión en que interviene más de un aspecto.

Valor del criterio: Sumatorio que se obtiene del valor de los indicadores de un mismo criterio por sus correspondientes pesos.

Valor del indicador: Valor en ordenada que se obtiene a partir de la cuantificación del indicador (abscisa) al aplicar la función de valor. El valor se suele situar en un rango entre 0 y 1.

Valor del requerimiento: Sumatorio que se obtiene del valor de los criterios de un mismo requerimiento por sus correspondientes pesos.

Vector pesos: Vector en que cada componente indica el peso del correspondiente aspecto dentro de un conjunto de aspectos homogéneos. Su dimensión coincide con el número de aspectos dentro del conjunto considerado homogéneo.

### 3.3. CLASIFICACIÓN TOMA DE DECISIÓN

Los análisis que implican toma de decisiones se pueden clasificar en función de diversos aspectos. En este apartado se consideran clasificaciones de las tomas de decisión según cuatro criterios. Estos criterios son por orden de presentación el estado del entorno, el número de aspectos de decisión, la naturaleza de las alternativas y las características del decisor.

#### 3.3.1. Según estado del entorno

Según el primer criterio correspondiente al estado del entorno, los problemas de decisión se pueden clasificar en:

- Problemas bajo certidumbre que corresponden a aquellos en los que se conoce la naturaleza de las alternativas (se conoce la cuantificación de cada uno de los indicadores evaluados para las alternativas estudiadas).
- Problemas bajo riesgo de incertidumbre corresponden a aquellos en los que existe un factor probabilístico de ocurrencia al no ser perfectamente conocidas las cuantificaciones de los indicadores para las alternativas estudiadas (existe cierto grado de desconocimiento de la evolución temporal de las alternativas).

#### 3.3.2. Según el número de aspectos de decisión

Según este segundo criterio en función del número de aspectos de decisión tendremos:

- Problemas monocriterio en que las decisiones se toman bajo un único aspecto. En el caso concreto de problemas de decisión monocriterio bajo certidumbre la elección de la mejor alternativa es la que mejor valoración tiene.
- Problemas multicriterio en que las decisiones se toman bajo un conjunto de aspectos, existiendo una contradicción entre alternativas de manera que la solución eficiente se encuentra formada por más de una alternativa y se hace necesario encontrar una solución de compromiso.

#### 3.3.3. Según la naturaleza de las alternativas

Según este tercer criterio y en función de la naturaleza de las alternativas tendremos:

- Problemas continuos cuando el conjunto de alternativas es no numerable quedando definidas de forma implícita.



- Problemas de decisión discretos donde el conjunto de alternativas es numerable y el número de alternativas finito o infinito. Se supone que las alternativas consideradas se encuentran definidas de forma explícita y de número no muy elevado.

#### 3.3.4. Según las características del decisor

Según las características del decisor, los problemas de decisión se pueden clasificar en:

- Problemas uniexperto en que la toma de decisión se hace por una sola persona o entidad.
- Problemas multiexperto en que el decisor se encuentra formado por más de una entidad o individuos de forma consensuada.

### 3.4. CLASIFICACIÓN METODOLOGÍAS TOMA DECISIONES

Las diferentes metodologías de análisis de toma de decisiones se pueden englobar en cuatro grupos que presentan diferentes enfoques:

- Teoría de la utilidad multiatributo (MAUT), en que se busca encontrar una función global que tiene su origen en la agregación de cada una de las funciones de valor de los indicadores que se han tenido en cuenta.
- Programación multiobjeto, con metodologías similares a las del grupo anterior pero que se aplica a problemas de toma de decisiones continuas. Se pueden considerar como una generalización al caso multiobjetivo de la programación lineal.
- Teoría de relaciones de sobreclasificación, corresponde a un enfoque científico a la toma de decisiones basado en la comparación sistemática de cada par de alternativas en todos los aspectos estudiados.
- Disgregación de preferencias, centrado en la creación de un modelo coherente con las decisiones tomadas de forma previa. Se trata de un proceso inverso al de las metodologías anteriores decidiendo en primer lugar la alternativa mejor y creando el modelo de valor coherente con esta.

### 3.5. METODOLOGÍA TOMA DE DECISIÓN EMPLEADA

En la presente tesina se realiza la toma de decisión entre dos alternativas de construcción de un túnel con tuneladora o a cielo abierto. Para la elección de la metodología a utilizar se ha seguido un proceso que de forma resumida se presenta en los siguientes puntos:

- Análisis de la clasificación de la toma de decisión.
- Elección de la corriente metodológica utilizada.
- Ordenación de los aspectos a estudiar.
- Establecer la función de valor genérica.
- Establecer el tipo de agregación a utilizar.
- Determinar la metodología de asignación de pesos.

### 3.5.1. Clasificación de la toma de decisión realizada

#### Según el estado del entorno:

En nuestro caso la naturaleza de las alternativas se conocen perfectamente. Es decir en el caso que nos ocupa se conocen todas las características a nivel de definición, coste, capacidad estructural, etc.

En ningún caso se valora una posible alternativa de la cual no se conocen todas sus características.

#### Según el número de aspectos de decisión:

La toma de decisión de nuestro caso se clasifica como un problema de toma de decisión multicriterio. En nuestro caso se deberá integrar en la toma de decisión aspectos de tipo funcional, económicos, sociales y medioambientales.

#### Según la naturaleza de las alternativas:

El número de alternativas que se valoran se trata de un número discreto y finito. En la toma de decisión se valorarán dos alternativas.

#### Según las características del decisor:

En la toma de decisión realizada en la presente tesina, el decisor es un unipertito. En este caso se trata del autor de la misma tesina.

### 3.5.2. Corriente metodológica de la toma de decisión utilizada

De las cuatro corrientes metodológicas explicadas anteriormente se analiza en el presente apartado la adecuación de su utilización al caso estudiado.

La primera de las corrientes metodológicas analizada corresponde a la programación multiobjetivo pensada para resolver problemas de decisión multicriterio continuos. A pesar de que los métodos de esta corriente se pueden aplicar a tomas de decisión discretas no se han considerado para la presente tesina al tratarse de una toma de decisión formada por alternativas finitas y discretas.

Las metodologías consideradas dentro de las relaciones de clasificación presentan el problema que en algunos casos no es posible encontrar cuál es la mejor alternativa. Este hecho descarta las metodologías que pertenecen a esta corriente.

Los métodos de disgregación de preferencias se encuentran basados en un proceso inverso al del resto de metodologías ya que se parte de la alternativa escogida por el decisor para posteriormente construir un modelo de valor coherente con las respuestas del mismo. Estas metodologías quedan por ello asimismo descartadas.

La teoría de la utilidad multiatributo (MAUT) que persigue encontrar un índice de valor único para cada una de las alternativas a partir de la agregación de las diferentes funciones de valor de cada uno de los indicadores en estudio corresponde al enfoque adecuado para el tipo de problema analizado en la presente tesina. El modelo de valor se realiza en base a las preferencias del decisor en forma de los diferentes pesos asignados a cada uno de los aspectos valorados. Esta metodología se encuentra pensada para poder resolver problemas de toma de decisión en las que el número de alternativas es discreto. Estos factores han hecho considerar como más adecuada al tipo de problema planteado en la presente tesina la metodología de toma de decisión multicriterio según la teoría de la utilidad multiatributo.

### 3.5.3. Ordenación de los aspectos a estudiar

Una vez que se han establecido los aspectos a considerar en una toma de decisión multicriterio debemos ordenar estos de una forma que sea más fácil abordar el problema en su conjunto. Una forma eficiente de afrontar esta ordenación consiste en la construcción de un árbol que en este caso denominaremos árbol de toma de decisión.

El árbol que elaboraremos en nuestro caso tendrá un primer nivel de aspectos más generales que denominaremos requerimientos para posteriormente establecer un desglose de los mismos en criterios e indicadores. Este enfoque se corresponde con una construcción del árbol denominada de arriba abajo.

En el caso que nos ocupa se han considerado tres requerimientos a saber: económico, social y medioambiente. En un segundo nivel los requerimientos se han dividido en criterios que a su vez se dividen en indicadores de aplicación al estudio realizado.

La asignación jerarquizada como la definida en el presente estudio es más rica que la no jerarquizada en el sentido de que genera un mayor contraste (varianza) de los pesos

obtenidos. Tendremos por tanto que el conjunto de pesos será más disparejo al realizarse una ordenación de los aspectos mediante un árbol de toma de decisión que incorpore diversos niveles que si no se emplea dicha ramificación.

La ordenación mediante un árbol de toma de decisión además aporta otras ventajas como son la agrupación según la temática en función de los requerimientos, valoración de zonas intermedias del árbol para cada una de las alternativas estudiadas o servir de recordatorio de los aspectos importantes.

#### **3.5.4. Función de valor utilizada**

Uno de los puntos esenciales en la definición del análisis multicriterio corresponde a la definición de la función de valor que se adecue al análisis realizado.

De manera usual se emplea un intervalo de definición de la función de valor entre 0 y 1 pudiendo en todo caso emplearse otro que fuera más adecuado. En el caso que nos ocupa se ha mantenido el intervalo típico para la función de valor.

La construcción de la función de valor ha de considerar como aspectos fundamentales el conocer los puntos por los que debe de pasar la misma así como encontrar una función de valor genérica que permita adoptar la mayoría de formas existentes.

En nuestro caso se emplean funciones de valor unimodales (siempre crecientes o decrecientes) que son las usadas en la metodología MIVES. La función de valor utilizada corresponde a una función genérica de tipo exponencial que puede ser adaptada en su forma en función de la cuantificación del indicador pasando a una función lineal, logarítmica, exponencial y en "S". Se trata de una función que se adapta a las formas unimodales de funciones para poder reproducir de forma flexible las características necesarias de los diferentes indicadores.

#### **3.5.5. Tipo de agregación a utilizar**

En el caso de la corriente metodológica de la teoría de la utilidad multiatributo pueden usarse diferentes métodos de agregación como pueden ser la suma o el producto ponderado, los métodos PRES o PRES II multiexperto o los procesos analíticos jerárquicos (AHP) o analítico en red (ANP). Los procesos analíticos (AHP y ANP) no corresponden estrictamente a métodos de agregación de las diferentes valoraciones sino que utilizan un método específico que es muy parecido a la suma ponderada.

En nuestro caso se ha considerado la utilización de la suma ponderada como método de agregación. En esta metodología los pesos corresponden a tasas de intercambio que indican

cuantas unidades de un indicador o criterio o requerimiento son necesarios para compensar una unidad en otro indicador, criterio o requerimiento de forma respectiva.

### 3.5.6. Tipo de asignación de pesos

Existen una gran cantidad de métodos para la asignación de pesos a los términos considerados como homogéneos ya sean los indicadores de un mismo criterio, los criterios de un mismo requerimiento y los mismos requerimientos. En el caso de la utilización de la aplicación MIVES las metodologías para la asignación de pesos que se pueden emplear son las siguientes:

- Asignación directa que se puede emplear en caso de que el decisor tenga determinados los valores de los pesos.
- Comparación a partir de una referencia única.
- Comparaciones sucesivas
- Compensación de alternativas.
- Cálculo de la diversidad de valoraciones.
- Matriz de comparación por pares.
- Matriz de dominación.
- AHP.

Esta última metodología es la que se utiliza de manera habitual para la asignación de pesos en MIVES. En esta metodología se debe aportar una comparación de grupos de aspectos considerados uniformes entre sí (indicadores de un mismo criterio, criterios de un mismo requerimiento o el conjunto de requerimientos). A partir de las comparaciones realizadas se lleva a cabo la creación de una matriz que denominamos de comparación por pares que permite calcular el vector de pesos y su consistencia en conjunto.

### 3.5.7. Síntesis elección metodología empleada

Podemos concluir a modo de resumen que en el caso de estudio de la presente tesina se llevará a cabo mediante la herramienta MIVES y con una metodología con las siguientes características:

- Metodología englobada dentro de la corriente metodológica de la teoría de utilidad multiatributo.
- Los aspectos a considerar se estructuraran en forma de árbol de decisiones.
- La función de valor genérica corresponde a la utilizada en MIVES.
- El tipo de agregación que se realizará corresponde a una suma ponderada.

- La metodología de asignación de pesos será la directa, de comparación mediante una sola referencia o AHP.

### 3.6. IMPLEMENTACIÓN TOMA DE DECISIÓN EMPLEADA

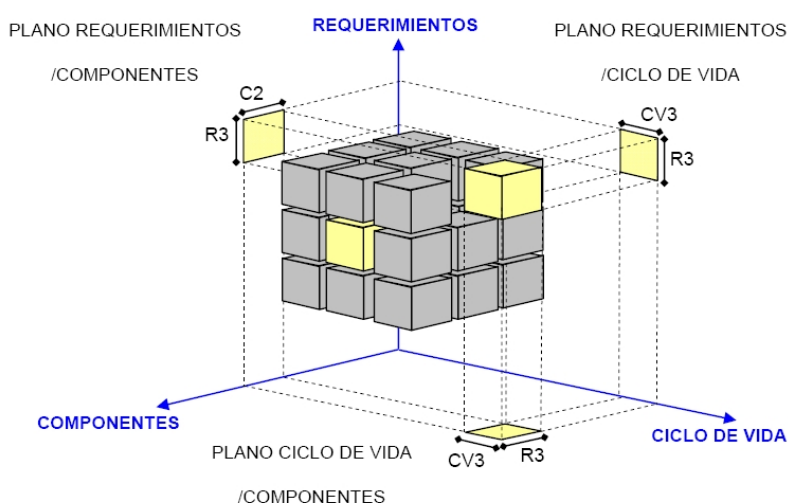
Para la implementación de la toma de decisión emplearemos la metodología MIVES. Esta metodología de toma de decisión multicriterio evalúa cada una de las alternativas de un problema genérico definido, a través de un índice de valor. La metodología se encuentra definida en varias fases que ordenadas de forma cronológica son las siguientes:

- Delimitación de la decisión: en que se define quién fija la decisión a la vez que se establecen los límites del sistema y las condiciones de contorno.
- Introducción del árbol de decisión: en que se ordenan de forma ramificada los aspectos a tener en cuenta en la decisión.
- Definición de las funciones de valor: en esta fase se crean unas funciones para poder obtener valoraciones entre 0 y 1 para todos los aspectos pertenecientes al último nivel de la ramificación del árbol de decisión.
- Asignación de pesos: se asigna la importancia relativa de cada uno de los aspectos en relación al resto para cada una de las ramas del árbol de toma de decisión.
- Definición de las alternativas: se definen para el problema de decisión planteado las diferentes alternativas factibles. En determinados casos, las alternativas pueden estar prefijadas por lo que se omite esta fase.
- Valoración de las alternativas: mediante la obtención del índice de valor para cada una de las alternativas.
- Realización del análisis de sensibilidad: analizando el posible cambio del índice de valor para cada alternativa en caso de que se varíen los pesos o las funciones de valor definidas con anterioridad. Se trata de una fase opcional.
- Contrastación de resultados: en la que se comprueba si el modelo de valoración se sigue ajustando a lo que se pretendía valorar en un inicio a largo plazo, así como si los cálculos realizados en cada una de las alternativas es el esperado.

Algunos de los elementos que definen las fases ya han sido descritos con anterioridad. En los siguientes apartados se describen algunas de las fases que no han sido tratados en su conjunto hasta el momento o se amplía la descripción de aquellas que ya se han tratado con anterioridad.

### 3.6.1. Delimitación de la decisión

Esta etapa permite estructurar y delimitar la toma de decisión que pretendemos realizar. En la etapa los aspectos fundamentales relacionados con la toma de decisión corresponden a establecer quién toma la decisión, cuales son los límites del sistema y qué condiciones de contorno existen. En nuestro caso la toma de decisión la realiza el autor de la tesina. Respecto a los límites del sistema se considera en el caso de una toma de decisión se puede identificar una estructura en tres ejes tal y como se recoge en la Figura 3.1.



**Figura 3.1: Estructura general de la toma de decisión (Fuente: manual MIVES).**

Los ejes corresponden a los requerimientos los componentes y el ciclo de vida. El ciclo de vida corresponde a las fases temporales de las diferentes alternativas como pueden ser las fases de concepción, ejecución, uso y desconstrucción. El segundo eje de componentes permite diferenciar las partes que componen las alternativas. El tercer eje recoge los requerimientos o aspectos generales que permiten valorar las diferentes alternativas. En nuestro caso el ciclo de vida se restringe a la concepción y uso del túnel mientras que los componentes se ciñen al tramo de túnel considerado. Los requerimientos establecidos han sido económico, social y medioambiente.

Las condiciones de contorno corresponden a las circunstancias que rodean a la toma de decisión. Se establece que estas han de ser iguales para cada una de las alternativas consideradas para que los resultados sean comparables.

Algunas de estas condiciones de contorno pueden ser condicionantes limitantes de las alternativas de manera que estas no puedan superar ciertos límites (de tipo económico, temporal, seguridad, ...). La verificación de estos límites se realiza mediante una lista de chequeo que contiene un listado de condiciones mínimas que deben cumplir aquellas alternativas que quieran ser valoradas.

### 3.6.2. Árbol de toma de decisión

Como se ha indicado el árbol de toma de decisión corresponde a la ordenación en forma ordenada de los aspectos estudiados estructurados en la primera fase. En la Figura 3.2 se presenta un árbol de toma de decisión genérico.

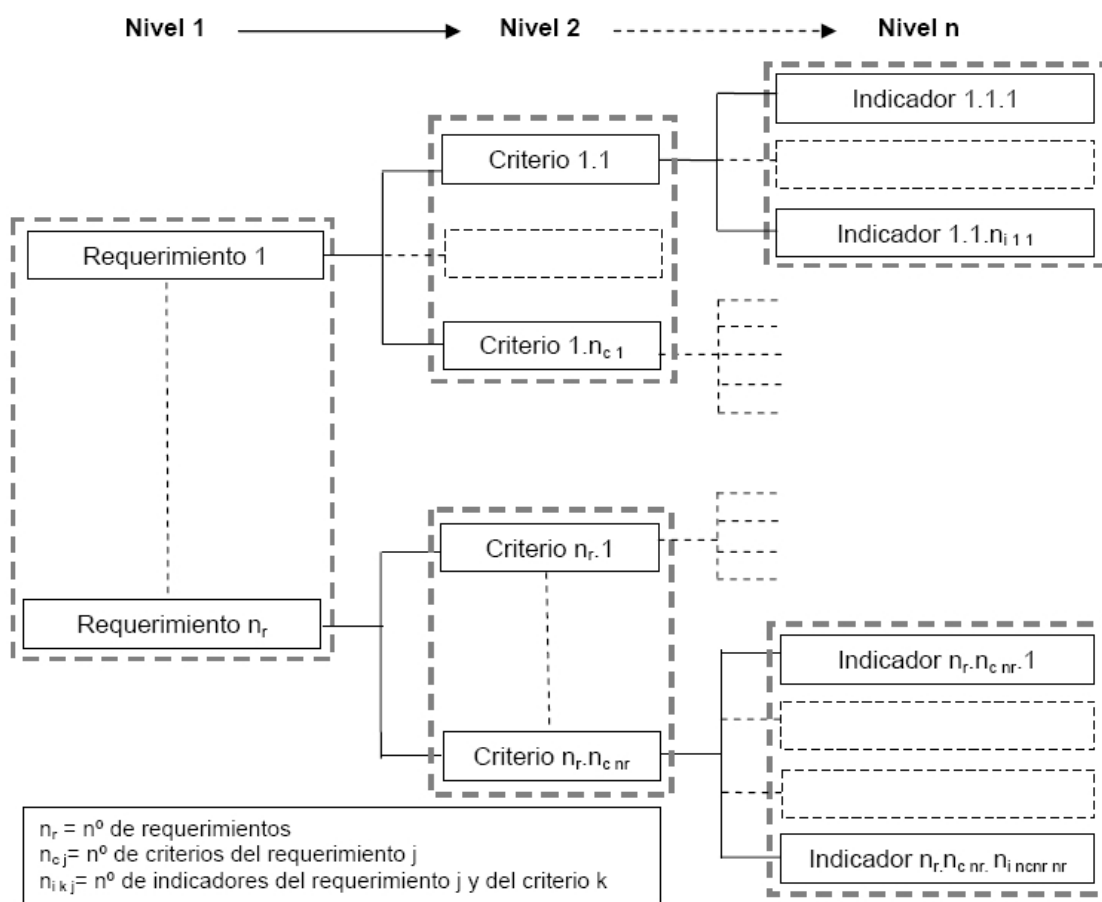


Figura 3.2: Árbol de toma de decisión genérico (Fuente: manual MIVES).

Los niveles del árbol de toma de decisión han sido expuestos en apartados anteriores. Como se ha indicado el primer nivel corresponde a los requerimientos que son los aspectos principales que conforman la decisión. En el nivel intermedio encontramos los criterios mientras que en el último nivel de la ramificación se encuentran los indicadores que serán evaluados de forma directa. En general no se aconseja realizar más de 3 o 4 niveles de ramificación y que el número de indicadores sea superior a 20 ya que corremos el peligro de que las valoraciones de los indicadores poco significativos diluyan el peso de los resultados realmente importantes.

En general se aconseja establecer los niveles superiores de requerimientos y criterios así como sus pesos relativos en base a los aspectos que se consideran más importantes y las



líneas de mejora que deben seguirse (políticos y gestores) mientras que en el caso de los indicadores, las funciones de valor y la asignación de pesos se aconseja que se adopten en base a criterios y aspectos técnicos.

Los requerimientos, criterios e indicadores han de representar de forma fiel lo que realmente se quiere valorar. Debemos conseguir que los diferentes niveles no presenten solape ni ocupar zonas de decisión que no les corresponden a la vez que hemos de conseguir que las zonas de decisión queden ocupadas en su ámbito de la manera más extensa posible.

Los indicadores por su parte han de tener las siguientes características principales:

- Representativos de la decisión que se quiere tomar.
- Discriminantes en la decisión de manera que se elegirán aquellos aspectos o características que hacen diferentes a las alternativas.
- Complementarios para poder abordar toda la información y que no se solapen entre ellos.
- Relativos de manera que no favorezcan aquellas unidades o elementos que pertenecen a grupos más grandes en valor absoluto.
- Cuantificable favoreciendo los indicadores que sean más fáciles de medir.
- Precisos de manera que el indicador presente el menor grado de incertidumbre y planteadas de forma muy clara.
- Trazables de manera que se pueda garantizar la comparación futura de los datos.

### 3.6.3. Funciones de valor

La función de valor presenta como objetivo principal poder comparar las valoraciones de los indicadores con unidades de medida diferentes. De esta forma podremos realizar una suma ponderada de los diferentes valores de cada uno de los indicadores. La función de valor nos permitirá pasar de una cuantificación de una variable o atributo a una variable adimensional comprendida entre 0 y 1.

Para llevar a cabo la valoración de los diferentes indicadores se parte de la cuantificación de cada uno de los indicadores para obtener el índice de valor de cada uno de ellos. El índice de valor se sitúa en el rango de las ordenadas de la función de valor entre 0 y 1. En el caso de indicadores en los cuales la valoración se mida a través de atributos se suelen convertir estos en una variable mediante una tabla de puntuación.

La forma genérica de la función de valor genérica utilizada en MIVES corresponde a la ecuación 3.1:

$$V_{ind} = B \cdot \left[ 1 - e^{-K_i \cdot \left( \frac{|x - x_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad [3.1]$$

donde:  $X_{m\acute{a}x}$  corresponde a la abcisa del indicador que da lugar a un valor igual a 1 (funciones de valor creciente).

$X_{m\acute{i}n}$  corresponde al valor en abcisas que da lugar a un valor igual a 0 (funciones de valor creciente).

$X$  corresponde a la abcisa del indicador evaluado de la función.

$P_i$  corresponde a un factor de forma que permite definir si la curva es cóncava, convexa, lineal o en forma de "S". Obtendremos curvas convexas para valores de  $P_i < 1$ , cóncavas o en forma de "S" para  $P_i > 1$  y lineales para valores de  $P_i = 1$ .

$C_i$  corresponde a la variable que sirve para desplazar el punto de inflexión y modifica la pendiente de la función de valor. Se puede aproximar en determinados casos a la abcisa del punto de inflexión.

$K_i$  corresponde a una variable cuya función corresponde a desplazar el punto de inflexión y modificar la pendiente de la función de valor. Se puede aproximar en determinados casos a la ordenada del punto de inflexión.

$B$  corresponde a un factor que mantiene las ordenadas dentro del rango entre 0 y 1. El factor viene definido por la siguiente ecuación 3.2:

$$B = \left[ 1 - e^{-K_i \cdot \left( \frac{|x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1} \quad [3.2]$$

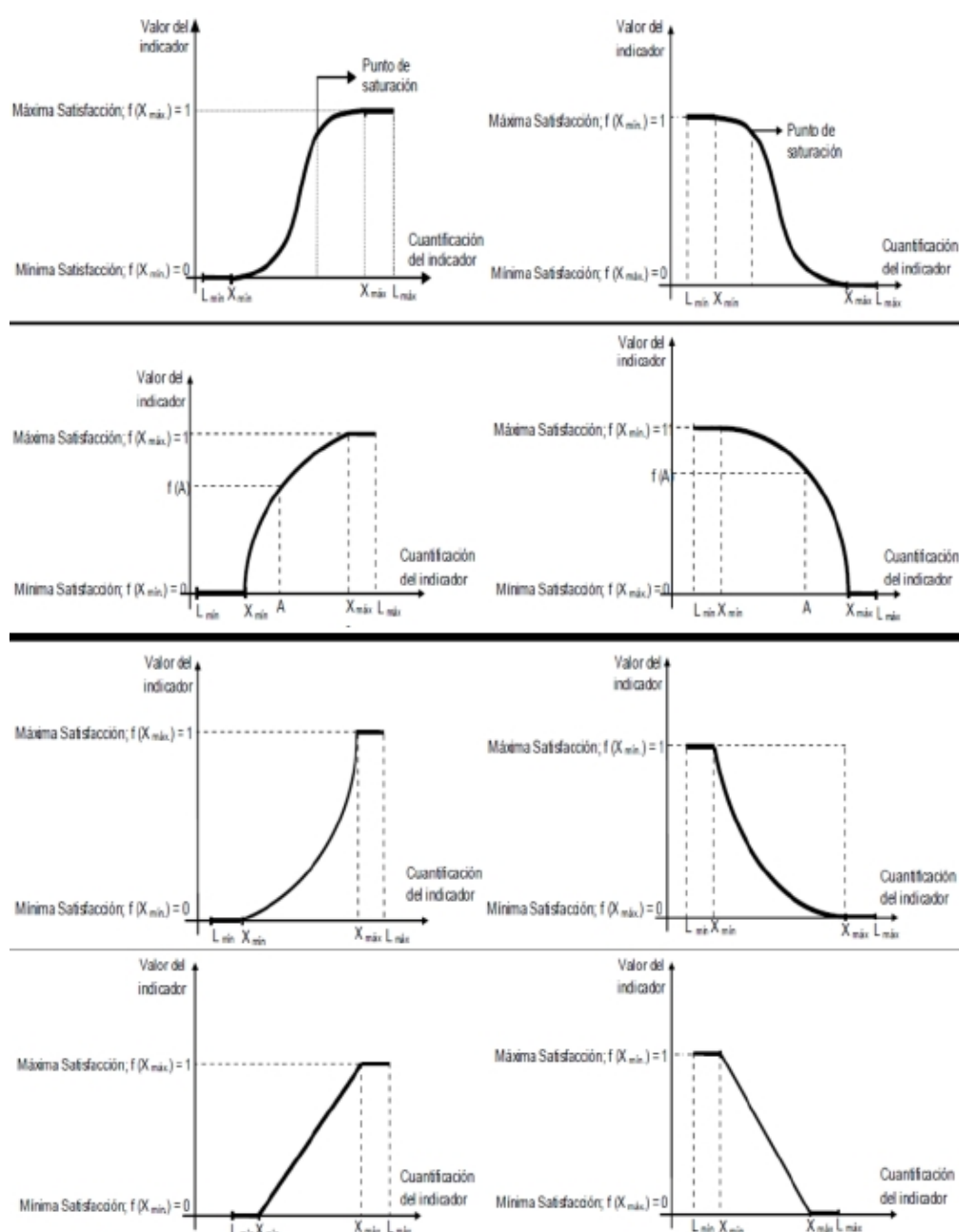
De forma alterna es posible utilizar funciones de tipo decreciente, es decir que adoptan el valor máximo en  $X_{min}$ . En este caso en la función de valor se sustituye la variable  $X_{min}$  por  $X_{max}$ . En este caso la expresión de la función de valor de tipo genérico es la ecuación 3.3, donde el valor del parámetro "B" no cambia en este último caso:

$$V_{ind} = B \cdot \left[ 1 - e^{-K_i \cdot \left( \frac{|x - x_{max}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad [3.3]$$

Como se ha indicado en función de los valores del factor de forma  $P_i$  la función adoptará diferentes formas. En la tabla 3.1 se muestran qué valores deben tomar  $P_i$  y  $K_i$  según la forma de la función de valor que queramos adoptar. En la Figura 3.3 se muestran algunas de las diferentes formas que la función puede adoptar.

Forma	$P_i$	$K_i$
Cóncava	$< 0,75$	$> 0,9$
Convexa	$> 2$	$< 0,1$
Lineal	1	$= 0$
S suave	$2 < P_i < 4$	$0,1 < K_i < 0,2$
S fuerte	$4 < P_i < 10$	$0,1 < K_i < 0,2$

**Tabla 3.1: Parámetros de la función de valor.**



**Figura 3.3: Formas que adopta la función de valor para diferentes valores de  $P_i$  (Fuente: manual MIVES)**

Proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con TBM o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio

### 3.6.4. Asignación de pesos

Mediante la asignación de pesos se da mayor relevancia a determinados aspectos en detrimento de otros. La asignación de pesos se realiza dentro una misma ramificación comparándose aspectos que sean homogéneos. De esta manera se calculan los pesos de los indicadores en relación a otros que pertenecen a un mismo criterio. Un proceso similar se realiza el mismo proceso a nivel de criterios dentro de un mismo requerimiento. Al conjunto de pesos de un grupo de aspectos homogéneos lo denominamos vector de pesos.

La asignación de pesos se puede realizar mediante una puntuación directa. Emplearemos este tipo de asignación en caso de existir pocos elementos de comparación o si se tienen claros los pesos de cada uno de ellos como por ejemplo en el caso de una importancia igual. De forma alternativa se pueden considerar otras metodologías para el cálculo de los pesos como el método de las proporciones o mediante la metodología AHP (Analytical Hierarchic Process – Proceso Analítico Jerárquico).

El método de las proporciones realiza una comparación de la importancia de cada aspecto con otro que utilizamos de referencia. El método resulta especialmente útil cuando podemos considerar algún aspecto de referencia respecto de los otros.

La metodología AHP se basa en la comparación por pares de todos los elementos entre ellos. La comparación se realiza de acuerdo con la comparación propuesta por Saaty (1980) en la que se admiten las situaciones intermedias y los inversos. La Tabla 3.2 recoge la escala de comparación por pares propuesto por Saaty.

Importancia relativa	Significado (i respecto j)	Elemento de la matriz	
		$a_{ij}$	$a_{ji}$
$\frac{1}{9}$	Absolutamente o extremadamente menos preferido	$\frac{1}{9}$	9
$\frac{1}{7}$	Mucho menos importante o preferido	$\frac{1}{7}$	7
$\frac{1}{5}$	Menos importante o preferido	$\frac{1}{5}$	5
$\frac{1}{3}$	Ligeramente menos importante o preferido	$\frac{1}{3}$	3
1	Igual importancia	1	1
Valores intermedios: 2, 4, 6, 8			

**Tabla 3.2:** Escala de comparación por pares propuesto por Saaty (1980) AHP.

Una vez realizada la comparación de todos los aspectos entre ellos se obtiene un matriz de comparación por pares que presenta como características una matriz diagonal con valor 1 en toda ella (aspectos comparados consigo mismo) y que el elemento simétrico de la matriz es el número inverso (si el indicador  $i$  respecto al  $j$  tiene una importancia de 4, la comparación del indicador  $j$  con el  $i$  será el valor inverso  $1/4=0,25$ ).

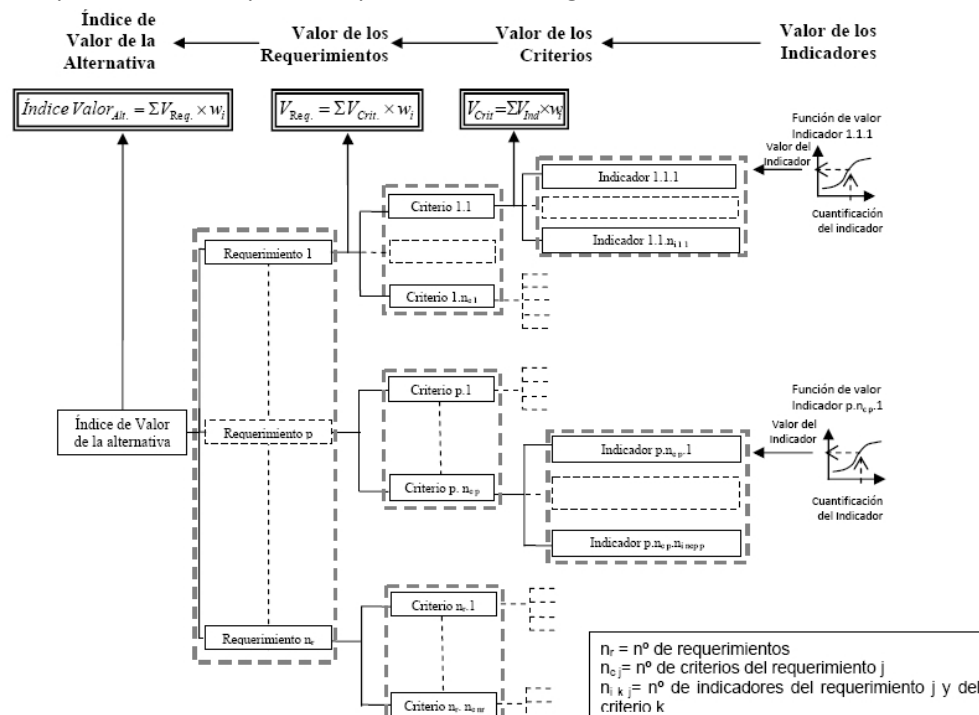
A partir de la matriz de comparación por pares se obtienen el vector de los pesos para ese aspecto a través del cálculo del vector propio de la matriz.

### 3.6.5. Definición de las alternativas

Una vez establecida la decisión a tomar y se ha creado el árbol de decisión con todas las funciones de valor y se ha determinado la asignación de pesos se procede a la definición de las alternativas a analizar. En algunos casos, como el analizado en la presente tesina, las alternativas se encuentran prefijadas al inicio de la toma de decisión y por ello no debemos proceder a la realización de esta fase.

### 3.6.6. Índice de valor de las alternativas

El siguiente paso en el procedimiento consiste en llevar a cabo la obtención del índice de valor de las alternativas consideradas a partir de la valoración de los indicadores. La valoración de los indicadores se realiza directamente a través de las funciones de valor. A partir de estas valoraciones se procede a la valoración de los criterios y de los requerimientos a través del procedimiento que se esquematiza en la Figura 3.4.



**Figura 3.4: Obtención del índice de valor de las alternativas (Fuente: manual MIVES).**

Los pasos que realizamos para la obtención del índice de valor de las alternativas y que se muestra de forma gráfica en la figura 3.4 corresponden a los siguientes:

- *Valor de los indicadores:* que se obtienen a partir de la función de valor y la cuantificación del indicador para cada alternativa. La cuantificación corresponde a la abscisa del punto de la función de valor cuya ordenada es el valor del indicador para la alternativa considerada.
- *Valor de los criterios:* el valor de los criterios se obtiene a partir del valor de los indicadores que forman parte de ese criterio multiplicando por los correspondientes pesos (donde n es el número de indicadores que pertenecen al criterio valorado).

$$V_{\text{Criterio}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{indicador}_i} \cdot W_i \quad [3.4]$$

- *Valor de requerimientos:* de forma similar se obtiene el valor de los requerimientos como el sumatorio de los valores de los criterios pertenecientes a ese mismo requerimiento multiplicados por sus pesos correspondientes (donde n es el número de criterios pertenecientes al requerimiento valorado).

$$V_{\text{Requerimiento}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{Criterios}_i} \cdot W_i \quad [3.5]$$

- *Índice de valor de las alternativas:* que obtenemos sumando el valor de los requerimientos multiplicados por sus respectivos pesos (donde n es el número de requerimientos).

$$\text{Índice de Valor}_{\text{Alternativa}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{Requerimientos}_i} \cdot W_i \quad [3.6]$$

### 3.6.7. Análisis de sensibilidad

El hecho de que la toma de decisión se realice por parte decisor hace que se encuentra sujeta a los intereses del mismo. En base a este hecho puede resultar interesante realizar un análisis de sensibilidad en el que varíen las preferencias del decisor con el fin de evaluar si este cambio implica una variación importante en el índice de valor de cada una de las alternativas. Esta fase de la metodología no debe realizarse siempre.

Para conocer la influencia de los diferentes parámetros que inciden sobre el índice de valor para cada una de las alternativas. Con este fin se llevan a cabo análisis de sensibilidad en dos aspectos concretos:

- *Sensibilidad respecto al modelo.* En este caso se analiza la variación de pesos a nivel de requerimientos ya que se considera que las modificaciones de pesos a nivel de

criterios o indicadores no tienen una influencia significativa. De forma adicional se puede llevar un análisis de la variación de los parámetros de la función de valor en cada uno de los indicadores.

- Sensibilidad respecto a las alternativas. En la mayoría de los casos algunos de los datos considerados en una toma de decisión no se pueden conocer con total exactitud. Por ello resulta importante examinar de que manera puede variar el índice de valor de las alternativas en caso que varíen las cuantificaciones de los indicadores estimados.

#### **3.6.8. Contraste de resultados**

Se trata de la última fase de la toma de decisión y al igual que en el caso del análisis de sensibilidad no es obligatorio realizarla. El objetivo de esta fase corresponde en verificar todos los aspectos que se han ido llevando a cabo en todas las fases.

## 4. ARBOL DE REQUERIMIENTOS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En capítulos anteriores se ha descrito el estado del arte en la construcción de túneles y la propuesta metodológica para afrontar el estudio de las alternativas. Para la aplicación práctica de esta metodología sin embargo debemos llevar a cabo una definición de cada una de las variables que queremos emplear.

El objetivo de este capítulo consiste en la definición del árbol de requerimientos que corresponde a la herramienta que nos permitirá evaluar las alternativas de ejecución del túnel así como la descripción y definición de cada una de las funciones de valor que conforman el árbol de requerimientos.

El capítulo comprende cuatro apartados en los que se definen las características del problema (tipo de infraestructura, condiciones de contorno y otras), los límites del sistema del modelo. El árbol de requerimientos y el desarrollo y definición de las funciones de valor. Los elementos desarrollados en el presente capítulo servirán de base en la validación de la metodología aplicada a un caso práctico que se presenta en el siguiente capítulo.



## 4.2. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

### 4.2.1. Problema general

Con el objetivo de construir un túnel en zona urbana podemos emplear dos soluciones constructivas diferentes. Las soluciones constructivas consideradas corresponden a una ejecución del túnel mediante tuneladora y del mismo túnel mediante una excavación a cielo abierto.

Los factores que influyen en la construcción de un túnel en zona urbana corresponden entre otros a la composición del subsuelo, la presencia o ausencia de nivel de agua, la longitud del túnel a excavar, la existencia de infraestructuras o edificios en superficie así como la profundidad del túnel a ejecutar.

### 4.2.2. Características específicas de los túneles

Los túneles construidos han de poder albergar una línea de metro de doble vía (dos sentidos de circulación) por el que puedan circular convoyes de vagones con las dimensiones y gálibos según las normas y estándares vigentes.

Con el fin de llevar a cabo la ejecución de un túnel en zona urbana se plantea dos alternativas que corresponden a la ejecución del túnel con tuneladora y la ejecución a cielo abierto.

- La solución mediante tuneladora corresponde a ejecutar un tubo de túnel formado por un anillo de dovelas prefabricadas que son dispuestas como sostenimiento de la excavación que realiza en el terreno la tuneladora y que sirve a la vez de reacción para el avance de la misma.
- La solución a cielo abierto consiste en la realización de un conjunto de pantallas de contención de los empujes del terreno y la posterior excavación del terreno interior situado entre ellas hasta alcanzar el nivel de solera. Con posterioridad se dispone una losa de cubierta del recinto excavado.

Los requerimientos de la sección conducen a un túnel de sección circular de 9,40 de diámetro exterior en el caso del túnel ejecutado mediante tuneladora y una sección de 10 m de ancho por 10 m de alto en el caso de la sección correspondiente a la ejecución del túnel mediante el sistema de excavación a cielo abierto.

En la Figura 4.1 se pueden observar las dimensiones de los convoyes en la sección para el caso de un túnel de geometría circular. La misma corresponde a la sección empleada en el caso del túnel de L9 de metro de Barcelona para el tramo 1; mientras que para el caso de la

alternativa de excavación a cielo abierto se presenta la sección del recinto entre pantallas en la Figura 4.2.

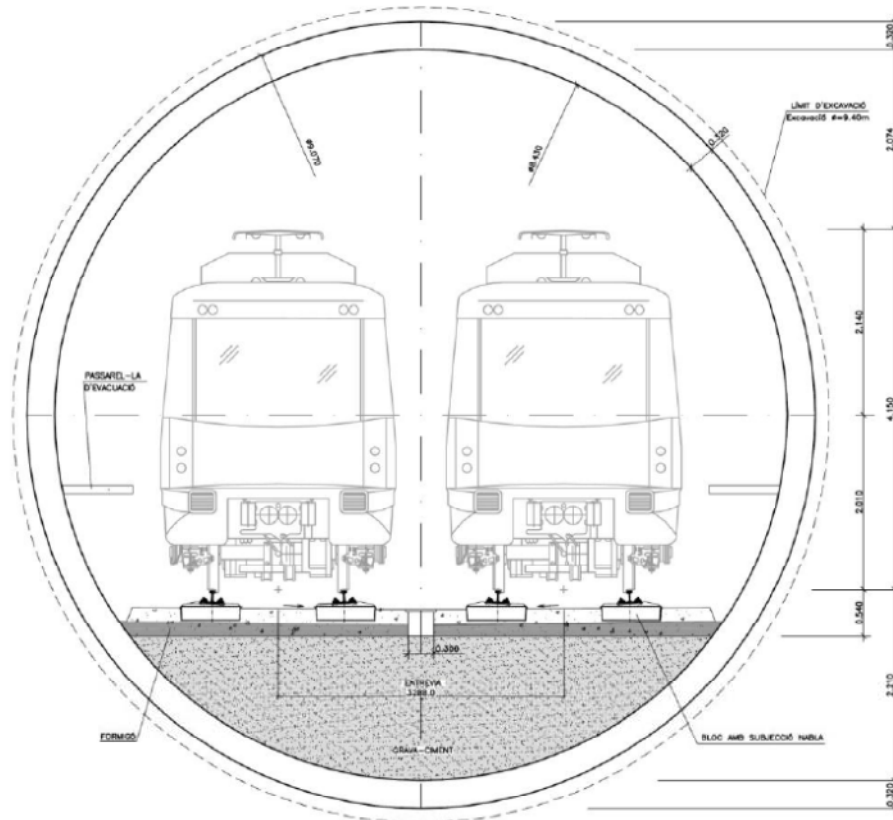


Figura 4.1: Sección de tuneladora de 9,40 m (L9).

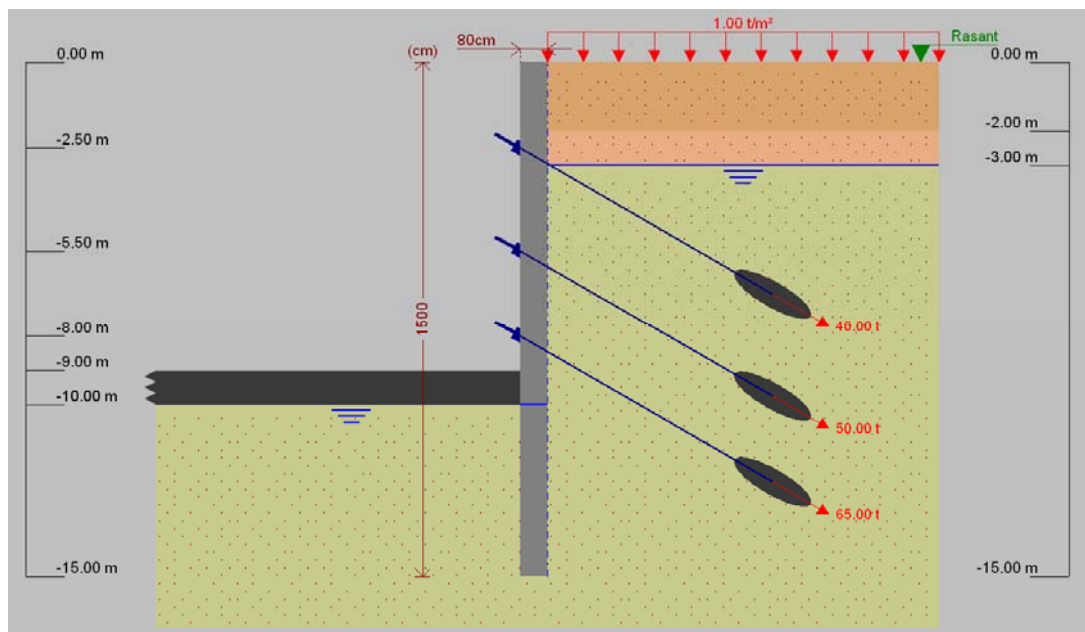


Figura 4.2: Sección de recinto entre pantallas (Cype muros pantalla).

### 4.3. DEFINICIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

#### 4.3.1. Alternativa túnel con tuneladora

En esta solución técnica se emplea una tuneladora; la cual es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación del sostenimiento. Para iniciar la excavación del túnel se debe partir de un recinto o pozo de ataque que permita situar la tuneladora a la profundidad deseada. Asimismo se hace necesario un recinto para la extracción de la tuneladora al final de trazado o en un punto intermedio de encuentro si se emplean dos tuneladoras. El proceso de construcción de la línea de metro mediante tuneladora implica asimismo el empuje de la tuneladora en los tramos de recintos apantallados correspondientes a las estaciones.

La excavación se realizará mediante una cabeza giratoria equipada con elementos de corte y accionada por motores hidráulicos que se alimentan mediante motores eléctricos. El empuje necesario para que se produzca el avance de la tuneladora se lleva a cabo mediante un sistema formado por gatos perimetrales que se apoyan en el último anillo de dovelas colocado.

Detrás del equipo de excavación y avance se dispone el “back up” de la tuneladora con una serie de plataformas que siguen al cabezal de perforación y en el que se alojan los equipos e instalaciones auxiliares junto con el sistema de evacuación de las tierras excavadas.

Las tuneladoras con cabeza giratoria presentan rendimientos elevados comparados con otros sistemas de excavación de túneles. Su uso sin embargo queda limitado por debajo de una longitud mínima de túnel a excavar para que resulte rentable. Otro de los factores que limita su utilización corresponde al trazado del túnel ya que este no puede ser con curvas cerradas. Un último factor que en algunos casos puede ser una penalización corresponde a la geometría circular de la sección excavada.

En el caso analizado se ha considerado una tuneladora tipo EPB con un diámetro de 9,40 m que perfora el terreno y dispone de manera simultánea al avance un sostenimiento formado por un anillo circular de dovelas. El trazado considerado es recto en toda su longitud (2,6 km de longitud de túnel).

En nuestro caso se contempla que el proceso de excavación mediante la tuneladora se iniciaría en el pozo existente situado al Sur de la Ronda Litoral en el inicio del carrer A de la Zona Franca. En nuestro caso se ha considerado que la retirada de la tuneladora se produciría en el recinto correspondiente a la estación situada en el extremo final de la línea (Nova Estació a Zona Franca). La tuneladora sería empujada en los 3 tramos de estaciones entre pantallas de unos 100 m de longitud cada una de ellas.

### 4.3.2. Alternativa a cielo abierto

La alternativa a cielo abierto corresponde a una solución constructiva que normalmente se utiliza en zonas urbanas con calles o avenidas lo suficientemente anchas para poder realizar los elementos de contención y la posterior excavación.

La solución proyectada incluye una fase inicial de desvío de los servicios afectados provisionales y definitivos que se deben de ejecutar antes de las actuaciones principales de la obra. Una vez finalizada la fase de ejecución de los desvíos de servicios se procede a la ejecución de las pantallas perimetrales de 0,8 m de espesor y una longitud de 15 m. Tras la ejecución de las pantallas se procede a la excavación por fases del recinto entre pantallas. Las fases de excavación se alternan con fases de ejecución de los anclajes de contención. En nuestro caso se ha previsto la ejecución de 4 fases de excavación y de 3 niveles de anclajes al terreno.

Tras la última fase de excavación se procede a la ejecución de la solera contra el terreno que cierra la sección. Tras la construcción de la solera se procede a la ejecución de la losa de cubierta que cierra la sección excavada con lo que se dará por concluida la construcción de la estructura del túnel. Restaría por finalizar las actuaciones en superficie correspondientes al restablecimiento de los servicios y la urbanización de la zona.

### 4.3.3. Listado de chequeo (verificaciones)

De forma previa a la fase de evaluación hemos de verificar que las alternativas propuestas cumplen las especificaciones reglamentarias que corresponden a los diferentes ámbitos. Los aspectos analizados se ceñirán a los que tengan incidencia sobre las soluciones estructurales consideradas. Con este fin se presenta la tabla 4.1 con la lista de las verificaciones realizadas para nuestro caso en estudio.

Parámetros	Especificaciones
Estructurales	Estándar de proyecto requerido
	Acuerdos geométricos en planta y alzado, radios mínimos, etc.
	Anchura de vías de metro internacional (1435 mm)
	Entrevía (3288 mm)
	Gálibo de tipo estrecho
	Pendiente longitudinal inferior al 4%
	La sección transversal debe incluir: carriles y pasarelas de evacuación
	Capacidad para soportar las cargas de tráfico previstas
	Disposición de vía en placa
Técnicos	Disponibilidad de medios constructivos
	Conocimiento de los sistemas constructivo

**Tabla 4.1:** Requerimientos de obligado cumplimiento en una infraestructura de metro.

En la citada tabla 4.1 se relacionan las especificaciones correspondientes a los parámetros estructurales y técnicos que son cumplidos por las dos alternativas propuestas en el presente estudio. El estándar de proyecto requerido corresponde al nivel de calidad geométrico con el que se construye una infraestructura de este tipo para garantizar la seguridad de la misma. El tramo analizado presenta un trazado en planta recto por lo que no será un parámetro determinante. Se ha considerado el estándar de anchura de vía internacional (1435 mm) ya que es el ancho adoptado por la mayoría de líneas de metro existentes en Barcelona y en la L9. La pendiente longitudinal se ha considerado inferior al 4% establecido como valor límite estándar internacional en este tipo de infraestructuras.

#### 4.4. LÍMITES DEL SISTEMA

La metodología adoptada se basa en un modelo que comprende tres factores que son los requerimientos, los componentes y el ciclo de vida. Los requerimientos considerados han sido el económico, el social y el medioambiental. La selección se ha realizado en función de las necesidades del proyecto.

- Requerimiento económico. La necesidad de este requerimiento responde a la necesidad de incorporar los costes directos e indirectos de los diferentes elementos de la infraestructura. Se han planteado dos criterios relacionados con el requerimiento económico: costes y tiempo. El primero incluye el coste inicial, su probabilidad de desviación y el coste de mantenimiento. El criterio de tiempo incluye el tiempo de construcción y la desviación temporal.
- El requerimiento social diferencia entre los efectos sobre el productor y los efectos sobre terceros. Los efectos sobre el productor se analizan a través de las molestias para el productor y la seguridad del operario.
- Finalmente el requerimiento medioambiental pretende incorporar aquellos aspectos relacionados con el impacto ambiental durante las fases del ciclo de vida de la infraestructura. El requerimiento evalúa tres criterios correspondientes a uso de materiales reciclados, los consumos y las emisiones. El criterio de consumos considera la energía consumida y las materias primas utilizadas.

Los componentes considerados corresponden exclusivamente al túnel para poder alojar la línea de metro de doble vía. Por otro lado, el ciclo de vida que se considera corresponde a la fase de ejecución de la construcción del túnel y a la fase de explotación. No se ha considerado la fase previa de proyecto ni una fase posterior de demolición.

#### 4.4.1. Árbol de decisión

El árbol de decisión finalmente determinado se compone de 12 indicadores agrupados en 7 criterios y en los 3 requerimientos indicados. Se ha analizado que los indicadores utilizados fueran en la medida de lo posible discriminantes del caso analizado y que su número no fuera excesivo. Asimismo se ha intentado una distribución de los indicadores en cada uno de los requerimientos lo más uniforme posible. Hay que considerar que un número elevado de indicadores conduce a planteamientos poco manejables a la vez que no aporta mayor precisión y disolución del peso de los indicadores principales.

En la tabla 4.2 se presenta el árbol de decisiones determinado para el caso analizado. Se trata de un árbol formado por 12 indicadores que se agrupan en 7 criterios y 3 requerimientos. El número de indicadores es equilibrado entre la precisión buscada de la decisión (deben tener peso significativo) y el trabajo requerido para llegar a la misma.

REQUERIMIENTO	CRITERIO	INDICADOR
ECONÓMICO	Costes	Coste inicial de construcción
		Probabilidad desviación coste
		Coste de mantenimiento
	Tiempo	Tiempo de construcción
		Desviación temporal
SOCIAL	Efectos para el productor	Molestias para el productor
		Seguridad del operario
	Efectos a terceros	Molestias al entorno
MEDIOAMBIENTE	Consumos	Cantidad de energía consumida
		Cantidad de hormigón consumido
		Cantidad de acero consumido
	Emisiones	Cantidad CO <sub>2</sub> emitido

**Tabla 4.2: Árbol de requerimientos**

#### 4.5. DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONES DE VALOR

En este apartado se lleva a cabo la definición de las funciones de valor de los diferentes indicadores que conforman el árbol de requerimientos de la presente tesina y que se recogen en la tabla 4.2.

Una función de valor tiene como función principal el tratar de unificar las unidades de los distintos indicadores través de una escala de satisfacción. Para llevar a cabo dicha unificación se emplea un intervalo de las ordenadas de las funciones entre 0 y 1. La función de

valor de tipo genérico que se emplea para todos los indicadores corresponde a la del modelo MIVES y que presenta la forma general de la ecuación 4.1:

$$V_{ind} = B \cdot \left[ 1 - e^{-K_i \cdot \left( \frac{|x - x_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad [4.1]$$

donde:  $X_{max}$ : corresponde a la abscisa del indicador que da lugar a un valor igual a 1 (en el caso de funciones crecientes).

$X_{min}$ : corresponde al valor en abscisas que da lugar a una valoración igual a 0 (en el caso de funciones de valores crecientes).

$X$ : es la abscisa del indicador evaluado (la cuantificación del indicador).

$P_i$ : es el factor de forma que define si la curva es cóncava, convexa, lineal o en forma de "S". Se obtienen curvas de tipo convexo para valor de  $P_i < 1$ , de tipo cóncavo o en forma de "S" si  $P_i > 1$  y de tipo lineal para valores de  $P_i = 1$ .

$C_i$ : corresponde a la variable que permite desplazar el punto de inflexión de la función de valor y modificar la pendiente de la misma. En determinados casos el valor se puede aproximar a la abscisa del punto de inflexión.

$K_i$ : corresponde a la variable que permite desplazar el punto de inflexión y modificar la pendiente de la función de valor. En determinados casos el valor se puede aproximar a la ordenada del punto de inflexión

$B$ : corresponde al factor que mantiene la función de valor dentro del rango de 0 a 1. El factor viene definido por la siguiente ecuación 4.2:

$$B = \left[ 1 - e^{-K_i \cdot \left( \frac{|x_{max} - x_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1} \quad [4.2]$$

De forma alterna es posible utilizar funciones de tipo decreciente, es decir que adoptan el valor máximo en  $X_{min}$ . En este caso en la función de valor se sustituye la variable  $X_{min}$  por  $X_{max}$ . En este caso la expresión de la función de valor de tipo genérico es la ecuación 4.3, donde el valor del parámetro "B" no cambia en este último caso:

$$V_{ind} = B \cdot \left[ 1 - e^{-K_i \cdot \left( \frac{|x - x_{max}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad [4.3]$$

Las funciones han sido determinadas en función de los criterios establecidos por el autor de la presente tesina, en base a su experiencia práctica. Evidentemente, en una aplicación fuera del ámbito académico, para una relación con terceros, estas funciones deben ser acordadas previamente y se puede hacer intervenir un comité de expertos ya sea con miembros ajenos o bien del ámbito de la empresa o administración contratante.



### 4.5.1. Coste inicial de construcción

#### 4.5.1.1. Objetivo

El objetivo de este indicador corresponde a establecer la valoración del coste en euros por metro de túnel ejecutado. En el indicador se incluyen los costes de construcción de la infraestructura de obra civil del túnel considerado. No se incluye el coste de la construcción de las estaciones de nuestro caso. En el estudio se considera el coste de ejecución material de la obra (PEM) y no se incluyen los costes asociados a la planificación, licitación, administración, beneficio industrial,...

#### 4.5.1.2. Forma de valorar

El indicador se obtiene dividiendo el coste total de los trabajos para la construcción de obra civil de la infraestructura de túnel para el tramo analizado por su longitud en metros. Para este indicador se han realizado diversos trabajos adicionales.

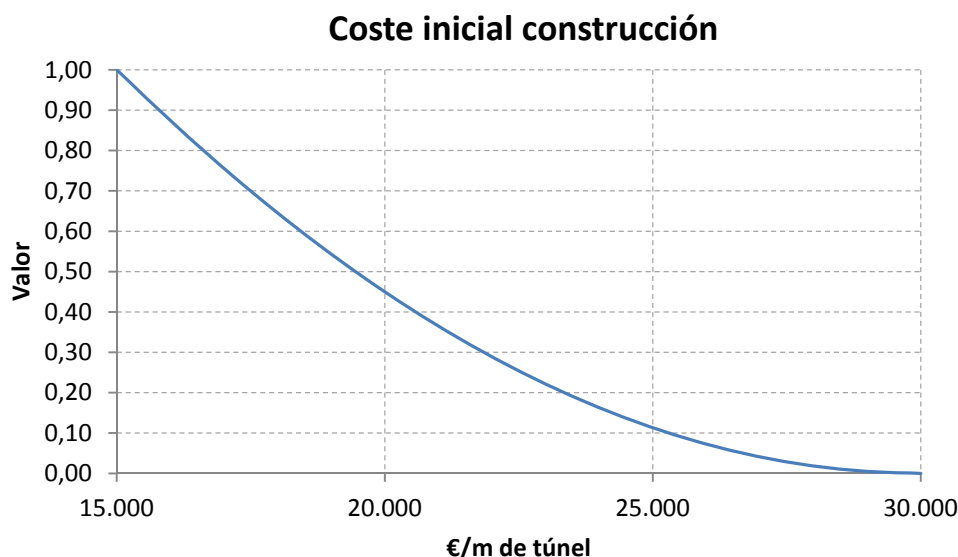
En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora se ha partido de datos disponibles de coste de ejecución del túnel de L9 en Barcelona. Los datos disponibles para un túnel de las mismas características del considerado en el presente estudio muestran un intervalo para el coste del túnel entre 15.000 y 20.000 €/m (datos de tramos existentes de L9). Las características consideradas corresponden al túnel de L9 en el tramo 1 con un diámetro de 9,4m.

De forma alternativa se ha considerado la utilización de una aplicación desarrollada por Ignacio Sáenz de Santamaría Gatón (2007) en su tesina “Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles mecanizados”. En dicha tesina se desarrolla un modelo que predice el coste y el plazo de ejecución de un túnel ejecutado mediante tuneladora. La aplicación de este modelo se recoge en el anejo A que se encuentra al final del documento. A partir del análisis realizado para nuestro caso mediante el modelo se obtiene un coste de 22.067 €/m de túnel ejecutado. Sumando el coste del desplazamiento de la tuneladora en las zonas de estación se obtiene un valor final de 22.305 €/m. El incremento del precio en la ejecución del túnel respecto de los datos de referencia de L9 se explican por la menor longitud del túnel analizado respecto de los valores de referencia lo que implica un mayor peso de la amortización y de los costes fijos sobre el precio por metro de túnel ejecutado.

En el caso de la ejecución del túnel mediante excavación a cielo abierto se ha partido de los precios del Banco de Infraestructuras 2015 para obtener un presupuesto global de la ejecución material de esta alternativa. El presupuesto elaborado se encuentra en el anejo C al final del presente documento. A partir del presupuesto realizado se ha obtenido un coste de 22.805 €/m.

#### 4.5.1.3. Función de valor

Se ha definido una función de valor de tipo decreciente convexa. En la Figura 4.3 se presenta la función propuesta para la valoración del indicador.



**Figura 4.3:** Función de valor del indicador coste inicial de construcción.

En esta función se propone un valor mínimo de 15.000 €/m para la solución de menor coste y por tanto los valores cercanos a este límite inferior la satisfacción será máxima. Como límite superior se ha considerado un valor de 30.000 €/m. El punto de inflexión se ha situado en los 22.000 €/m.

#### 4.5.2. Desviación del coste

##### 4.5.2.1. Objetivo

El objetivo de este indicador corresponde a evaluar la desviación del coste considerado del proyecto. Este indicador incluye factores como desviaciones en el coste de la energía, materias primas o cambios en el presupuesto debido a modificaciones en el planteamiento inicial del proyecto.

##### 4.5.2.2. Forma de valorar

El indicador se valora dividiendo el porcentaje de desviación del coste de ejecución material del proyecto respecto del propuesto inicialmente. Este indicador presenta un rango de valores en el intervalo de 0 al 100 por cien.

#### 4.5.2.3. Función de valor

Se ha establecido una función de valor de tipo decreciente convexa como la mostrada en la Figura 4.4. En ella se considera la situación o satisfacción máxima para valores próximos al valor mínimo del 0% de desviación del coste inicial mientras que se propone un valor del 100% de desviación del coste inicial para una solución que presenta una desviación grande y por tanto una satisfacción mínima. No se han contemplado desviaciones negativas ni valores que sobrepasen el 100% ya que se consideran improbables que se den en el marco de las actuaciones previstas

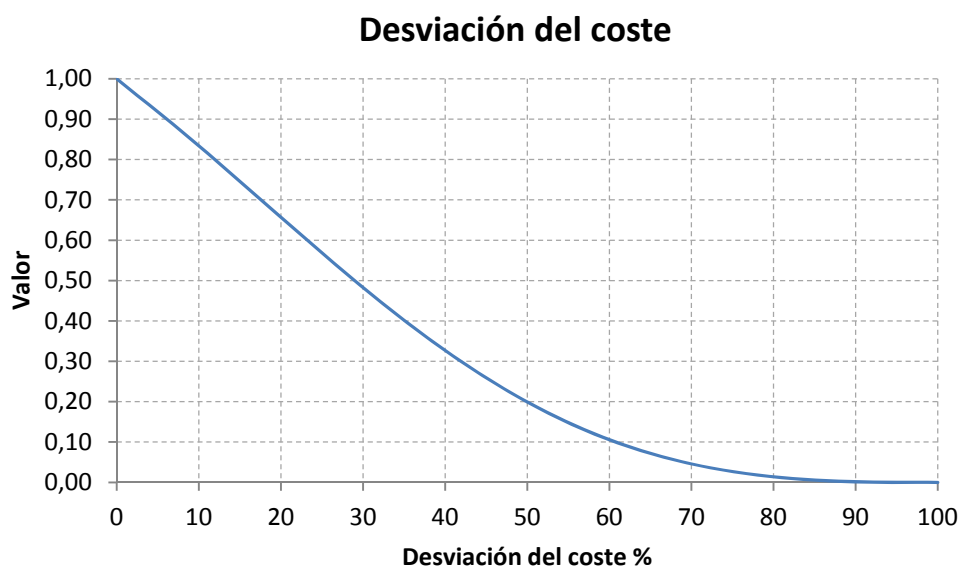


Figura 4.4: Función de valor del indicador desviación del coste (en %).

#### 4.5.3. Coste de mantenimiento

##### 4.5.3.1. Objetivo

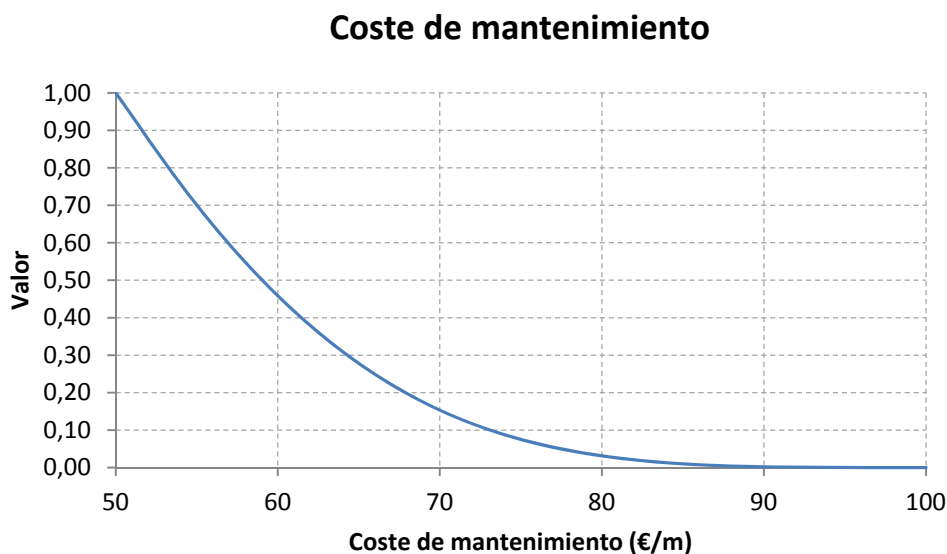
Este indicador mide el coste del conjunto de las actividades que serán necesarias con el objeto de llevar a cabo el mantenimiento del túnel. Este coste incluye los de mantenimiento de los elementos del túnel que han de garantizar su correcto funcionamiento durante la vida útil de la infraestructura.

##### 4.5.3.2. Forma de valorar

El indicador se obtiene a partir del resultado de dividir el coste de mantenimiento anual entre la longitud en metros del tramo de túnel. Los valores correspondientes a este indicador se sitúan en un intervalo entre 50 y 100 €/m y año. El intervalo se obtiene a partir del análisis del porcentaje del coste del mantenimiento sobre el coste inicial para este tipo de infraestructuras de obra civil.

#### 4.5.3.3. Función de valor

Como función de valor se ha adoptado una de tipo decreciente convexa como la mostrada en la Figura 4.5. En ella se considera un valor mínimo de la función de 50 €/m de coste de mantenimiento para el caso con un mantenimiento bajo y una satisfacción máxima así como un valor máximo de 100 €/m para la solución que presenta un coste de mantenimiento máximo y por tanto una satisfacción mínima.



**Figura 4.5:** Función de valor del indicador coste de mantenimiento.

Asimismo el punto de inflexión se ha considerado en 75 €/m que representa el valor medio de los costes de las actuaciones de mantenimiento. Si bien los datos son variables en función del tipo de mantenimiento, elementos conservados o del tipo de contratista que realiza el mantenimiento de la infraestructura se ha considerado mantener los valores al corresponder a los datos disponibles.

#### 4.5.4. Tiempo de construcción

##### 4.5.4.1. Objetivo

Este indicador corresponde a la medición del tiempo en meses para la realización de los trabajos de construcción del túnel. Este tiempo incluye los trabajos de desvío de servicios y posterior urbanización para la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto.

##### 4.5.4.2. Forma de valorar

El indicador mide el tiempo en meses que se emplea en la construcción del túnel en el conjunto del tramo a realizar. En el caso de la alternativa correspondiente a la ejecución del túnel mediante tuneladora se han empleado los resultados obtenidos en la estimación

mediante el modelo de la tesina de Ignacio Sáenz de Santamaría (2007). A partir del análisis realizado con el modelo se ha estimado la duración total en meses más probable de la ejecución del túnel mediante tuneladora.

En el caso de la ejecución del túnel mediante excavación a cielo abierto se ha procedido a un cálculo de la duración de las principales actividades a partir de los rendimientos y producciones con los que se ha elaborado el presupuesto de la alternativa. La estimación del plazo de ejecución de la alternativa mediante tuneladora se recoge en el anejo A mientras que el planning de la obra de la ejecución del túnel a cielo se encuentra en el anejo D.

#### 4.5.4.3. Función de valor

Para este indicador, se considera una función de valor decreciente convexa tal y como se presenta en la Figura 4.6. En ella se establece un valor mínimo del plazo del tiempo de construcción de 10 meses para una solución que ejecuten los trabajos de construcción con más rapidez y valores de satisfacción máximos. El valor máximo del plazo de ejecución se establece en 30 meses para ejecuciones de bajo rendimiento. El punto de inflexión se ha planteado en 15 meses al representar el tiempo medio de los distintos proyectos de los que se dispone de datos de tuneladoras en condiciones similares.

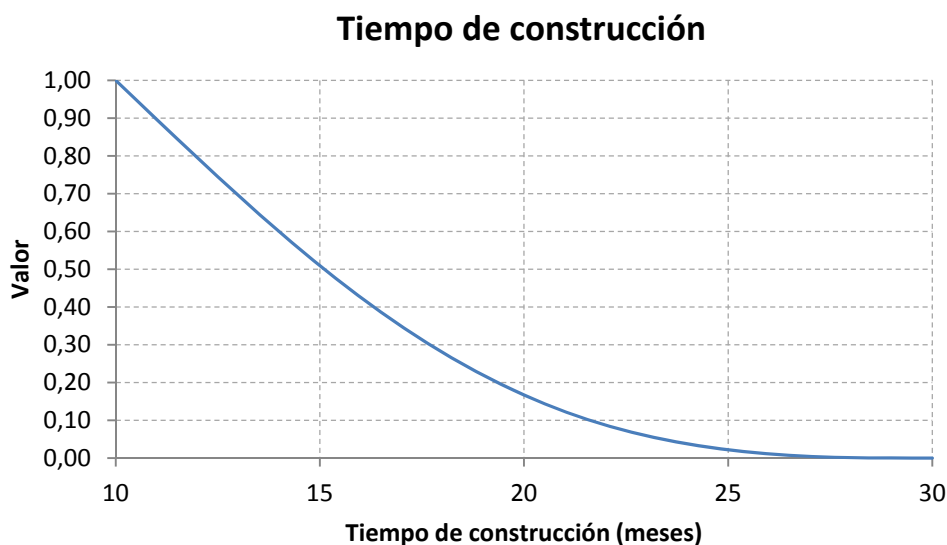


Figura 4.6: Función de valor del indicador tiempo de construcción.

#### 4.5.5. Desviación temporal

##### 4.5.5.1. Objetivo

El objetivo de este indicador corresponde a la valoración de la desviación del plazo de ejecución del túnel y puesta en servicio del mismo respecto de las previsiones iniciales. Los

factores que se consideran en este indicador corresponden por una parte a las condiciones climáticas adversas, por otra a las condiciones geotécnicas no previstas y finalmente a la conflictividad laboral. Si bien en fase de proyecto se intenta estimar estos aspectos pueden darse situaciones o aspectos que se escapen a esta estimación.

#### 4.5.5.2. Forma de valorar

Este indicador difiere de los anteriores ya que se basa en un sistema de puntuación que varía entre 0 y 100 puntos que se establecen de forma cualitativa a partir del comportamiento de la obra frente a los aspectos mencionados. El indicador se encuentra compuesto de 4 aspectos o parámetros. En la tabla 4.3 se muestran los parámetros y la puntuación asociada a cada uno de los aspectos considerados; habiéndose establecido 3 niveles de cumplimiento, para cada uno de los parámetros considerados.

Parámetro	Cumplimiento	Puntuación
Grado de independencia de la alternativa frente a las condiciones climáticas	Totalmente dependiente	0
	Grado intermedio de dependencia	10
	Totalmente independiente	25
Grado de independencia de la alternativa frente a las condiciones geotécnicas	Totalmente dependiente	0
	Grado intermedio de dependencia	10
	Totalmente independiente	25
Suministro de materiales	Fallo constante del suministro	0
	Fallo temporal del suministro	10
	Fallo puntual del suministro	25
Capacidad técnica de las contratas	Falta de capacidad en el sistema constructivo	0
	Conocimientos básicos del sistema constructivo	10
	Especialistas en el sistema constructivo	25

**Tabla 4.3:** Puntuación del indicador de desviación temporal

En el caso del parámetro del grado de independencia de la alternativa frente a las condiciones climatológicas se contemplan tres niveles de cumplimiento que corresponden en primer lugar a totalmente dependiente (0 puntos) en el caso de que más del 40% de los procesos se vean afectados por la climatología y por tanto incidan en un retraso de los trabajos. En segunda opción a un nivel intermedio de dependencia en que menos de un 40% de los procesos se ven afectados por las condiciones climáticas. Finalmente se considera la opción de totalmente independiente de las condiciones climáticas en que se considera que el sistema constructivo no se ve afectado por las inclemencias del tiempo.

El parámetro del grado de independencia de la alternativa frente a las condiciones geotécnicas incluye las desviaciones temporales atribuibles a cambios en las condiciones del

terreno esperables por la limitación de las prospecciones geotécnicas y asimismo las asociadas a la presencia y características de nivel freático en el terreno. Como en el caso anterior se establece una puntuación en función de la dependencia de las alternativas frente a posibles cambios en las condiciones geotécnicas. En el caso de tratarse de alternativas totalmente dependientes de estos factores se considera una puntuación de 0 puntos mientras que en el otro extremo se otorga una puntuación de 25 puntos en el caso de alternativas totalmente independientes de los factores geotécnicos. Para situaciones intermedias se considera una puntuación de 10 puntos.

Otro de los parámetros considerados corresponde al suministro de materiales que puede verse afectado por aspectos relacionados con la conflictividad. Se considera una puntuación máxima en el caso de que el suministro de materiales a la obra no se vea afectado. Se asigna una puntuación media si se trata de una problemática temporal en el suministro y la puntuación mínima en caso de existir problemas continuos en el suministro. En el caso del parámetro de la capacidad técnica del contratista se considera una puntuación máxima en el caso de un contratista especialista en el sistema constructivo considerado y una puntuación media en caso de un conocimiento básico del sistema constructivo. En caso de falta de capacidad del contratista se considera una puntuación nula.

#### 4.5.5.3. Función de valor

La función de valor propuesta para este indicador corresponde a una función creciente en S tal y como se muestra en la Figura 4.7. Mediante la función de valor, a medida que aumenta la puntuación del indicador, la satisfacción aumenta ya que ello implica una mejor previsión de la solución frente a la situación adversa considerada.

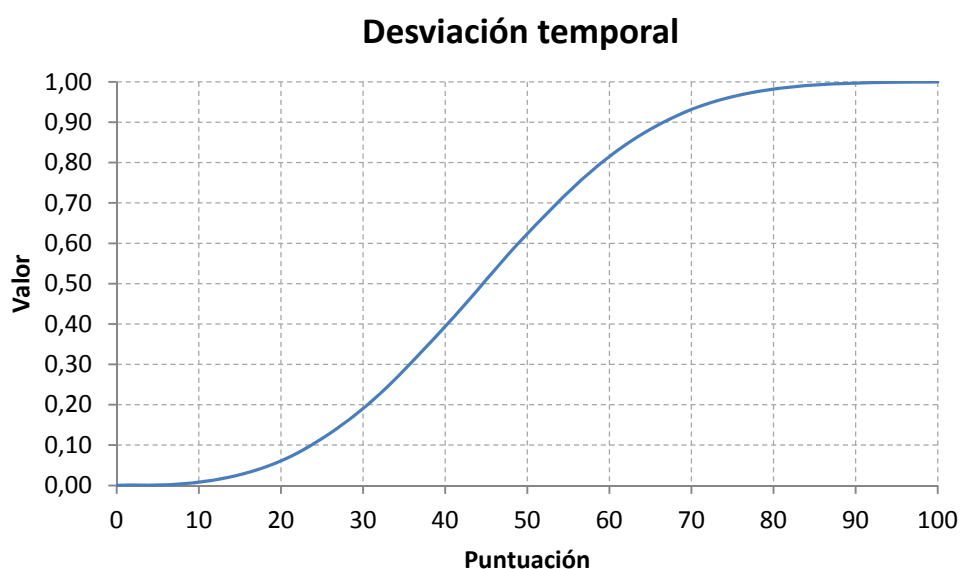


Figura 4.7: Función de valor del indicador desviación temporal

En ella, se considera un valor mínimo de 0 puntos para la solución que no cumpla con ningún parámetro de previsión frente a condiciones adversas (es decir mínima). De la misma manera se ha considerado un valor de 100 puntos en el caso de la solución que cumpla con el conjunto de factores que minimizan el riesgo de desvío temporal lo que implicará una satisfacción máxima. El punto de inflexión de la función se considera en 40 puntos que representa un grado de cumplimiento mediano de cualquiera de las soluciones.

#### 4.5.6. Molestias para el productor

##### 4.5.6.1. Objetivo

Con el presente indicador se persigue cuantificar las molestias para los productores de la obra es decir sobre la salud de los trabajadores que llevarán a cabo la construcción de la infraestructura.

##### 4.5.6.2. Forma de valorar

Se han considerado los siguientes agentes ambientales y riesgos asociados a los mismos:

- Ambientes con polvo (pulvígenos) que pueden provocar neumoconiosis y bronquitis crónica.
- Contactos de la piel con el hormigón que pueden producir alergias cutáneas y dermatitis.
- Exposición al ruido y las vibraciones generadas por maquinaria y vibradores que pueden producir hipoacusia o sordera profesional.
- Exposición a condiciones climáticas extremas debido a la realización de trabajos a la intemperie que pueden llegar a producir riesgo de estrés térmico en forma de golpe de calor, insolación deshidratación o enfriamiento.

Para la valoración del indicador se ha considerado un enfoque basado en un sistema de puntuación que varía entre 0 y 100 puntos establecidos de forma cualitativa a partir de la exposición de las actividades de construcción frente a los aspectos considerados. El indicador se encuentra compuesto de los 4 aspectos o parámetros asociados a los agentes ambientales citados.

En la tabla 4.4 se muestran los parámetros y la puntuación asociada a cada uno de los aspectos considerados. Para cada uno de los parámetros considerados se han establecido 3 niveles de riesgo. En el caso de los cuatro parámetros considerados se establece un primer nivel de riesgo bajo o nulo de exposición al riesgo ambiental con una puntuación de 0 puntos, un segundo nivel de riesgo correspondiente a un valor medio con una puntuación de 10 puntos y un tercer nivel de riesgo alto con una puntuación de 25 puntos.

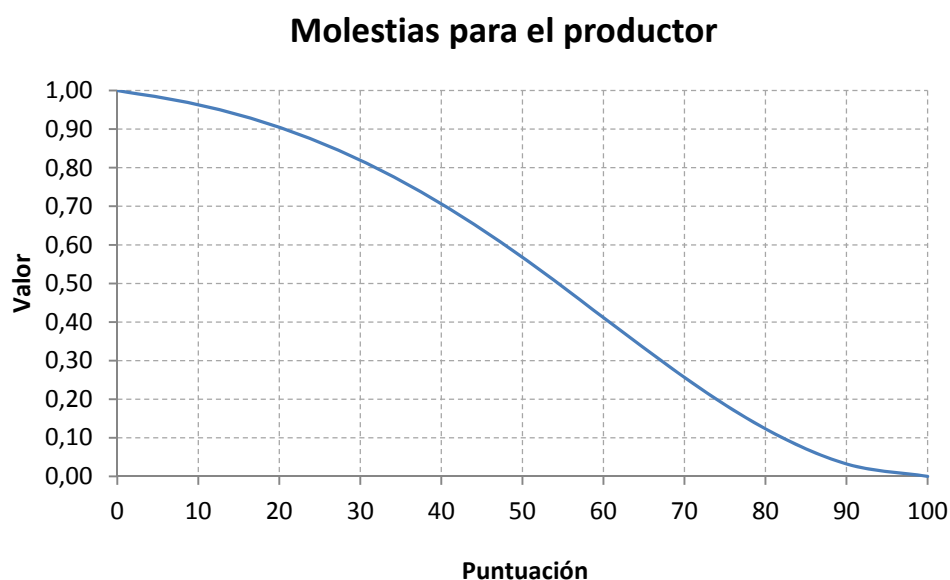


Parámetro	Nivel de riesgo	Puntuación
Ambientes con polvo	Riesgo bajo o nulo	0
	Riesgo medio	10
	Riesgo alto	25
Contactos de la piel con el hormigón	Riesgo bajo o nulo	0
	Riesgo medio	10
	Riesgo alto	25
Exposición al ruido y vibraciones	Riesgo bajo o nulo	0
	Riesgo medio	10
	Riesgo alto	25
Exposición a condiciones climáticas extremas	Riesgo bajo o nulo	0
	Riesgo medio	10
	Riesgo alto	25

**Tabla 4.4:** Puntuación del indicador de las molestias para el productor

#### 4.5.6.3. Función de valor

La función de valor considerada presenta la forma decreciente en S tal y como se puede observar en la Figura 4.8. Mediante la función de valor a medida que aumenta la puntuación del indicador la satisfacción disminuye ya que ello implica una mayor exposición de la solución los agentes ambientales.



**Figura 4.8:** Función de valor del indicador molestias para el productor.

Se considera un valor mínimo de 0 puntos para la solución con una situación hipotética con un nivel de riesgo de exposición bajo o nulo frente a los agentes ambientales considerados (satisfacción máxima). De la misma manera se ha considerado un valor de 100 puntos en el

caso de la solución que se vea afectada por riesgo alto de exposición para el conjunto de agentes ambientales lo que implicará una satisfacción mínima. El punto de inflexión de la función se considera en 40 puntos que representa un grado medio de riesgo asociado a las soluciones.

#### 4.5.7. Seguridad del operario

##### 4.5.7.1. Objetivo

Con este indicador se pretende evaluar el riesgo de accidente que corre el trabajador que se encontrará involucrado en la ejecución de cada una de las alternativas consideradas. Se cuantificará de forma global cuan segura es la ejecución de cada una de las alternativas.

##### 4.5.7.2. Forma de valorar

Para la valoración del indicador de seguridad del operario se lleva a cabo un estudio de seguridad y salud de cada alternativa considerada. En primer lugar se realiza un análisis de accidentes basado en la clasificación de riesgos laborales del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) que contempla 27 riesgos de accidente. A partir de la identificación de los riesgos de accidentes en las actividades se procede a un análisis de su probabilidad y gravedad que finalmente da lugar a una evaluación del riesgo identificado para cada actividad.

La evaluación de la probabilidad de cada uno de los riesgos laborales en función de la actividad puede tomar valores de baja, media y alta. La evaluación de la gravedad de cada uno de los riesgos laborales puede tomar valores de leve, grave o muy grave. Finalmente la evaluación del riesgo laboral puede tomar valores de trivial a intolerable (5 niveles) y se establece en función de la probabilidad y de la gravedad establecida según las siguientes combinaciones que asignan un valor asociado a la evaluación (Ver Tabla 4.5).

Evaluación		Gravedad		
		Leve (1)	Grave (2)	Muy grave (3)
Probabilidad	Baja (1)	Trivial (1)	Tolerable (2)	Moderada (3)
	Media (2)	Tolerable (2)	Moderada (3)	Importante (4)
	Alta (3)	Moderada (3)	Importante (4)	Intolerable (5)

**Tabla 4.5:** Evaluación de riesgos laborales en función de su probabilidad y gravedad.

La evaluación del riesgo puede tener por tanto un valor de 1 a 5. Los riesgos analizados para el conjunto de actividades son 27. A partir de la evaluación final del conjunto de riesgos identificados y evaluados se establece un índice basado en la suma de las máximas

evaluaciones para el conjunto accidentes posibles. Este índice tendrá un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 135.

#### 4.5.7.3. Función de valor

La función de valor considerada corresponde una función decreciente de tipo lineal con límite inferior de 0 y límite superior de 135. El resultado de la valoración se encontrará comprendido por tanto en el intervalo entre 0 y 1. En la Figura 4.9 se presenta la función considerada para este indicador.

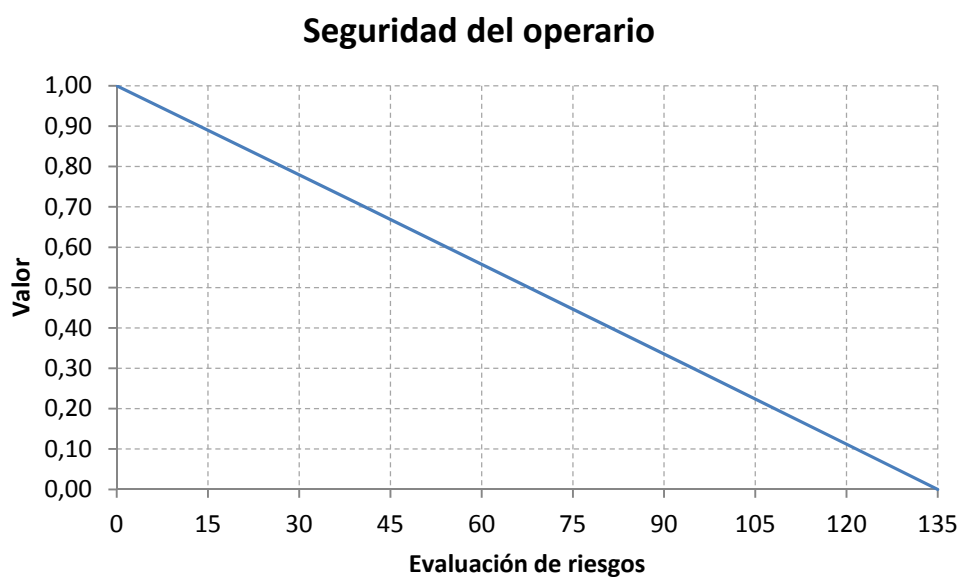


Figura 4.9: Función de valor del indicador seguridad del operario.

#### 4.5.8. Molestias al entorno

El indicador pretende valorar las consecuencias que genera la ejecución del túnel en su entorno, es decir al conjunto de personas que forman parte de las condiciones de contorno de la obra y que ven perjudicadas sus actividades, en mayor o menor medida, debido a la ejecución de las alternativas en estudio.

##### 4.5.8.1. Objetivo

El objetivo buscado con el indicador corresponde a la valoración de las molestias que sobre el entorno se producen durante la construcción del túnel.

##### 4.5.8.2. Forma de valorar

Para la cuantificación del indicador se emplean un conjunto de tres variables que describen las molestias al entorno. Estas tres variables son:

- Ruido producido durante la ejecución de los túneles.
- Molestias producidas a los transeúntes debido a la ejecución de los túneles.
- Molestias al tráfico debido a la ejecución de los túneles.

En la Tabla 4.6 se recogen los valores asignados a las diferentes situaciones de cada una de las tres variables consideradas.

MOLESTIAS AL ENTORNO				
MOLESTIA	PESO	ALTERNATIVA	CONSECUENCIA	PUNTUACIÓN
Molestias acústicas	70%	Nivel nulo	Nivel bajo de ruido	10
		Nivel medio	Nivel medio de ruido	3
		Nivel alto	Nivel alto de ruido	0
Molestias a los transeúntes	15%	Nivel nulo	Nula afectación	10
		Nivel medio	Acera parcialmente intervenida	5
		Nivel alto	Acera cortada	0
Molestias al tráfico	15%	Nivel nulo	Nula afectación	10
		Nivel medio	Corte parcial de calle	5
		Nivel alto	Corte total de calle	0

Tabla 4.6: Puntuación del indicador de molestias al entorno

#### 4.5.8.3. Función de valor

La función de valor propuesta corresponde a una función creciente al considerar que a medida que se reducen las molestias sobre el entorno mayor es la satisfacción que se genera, tal como se muestra en la Figura 4.10.

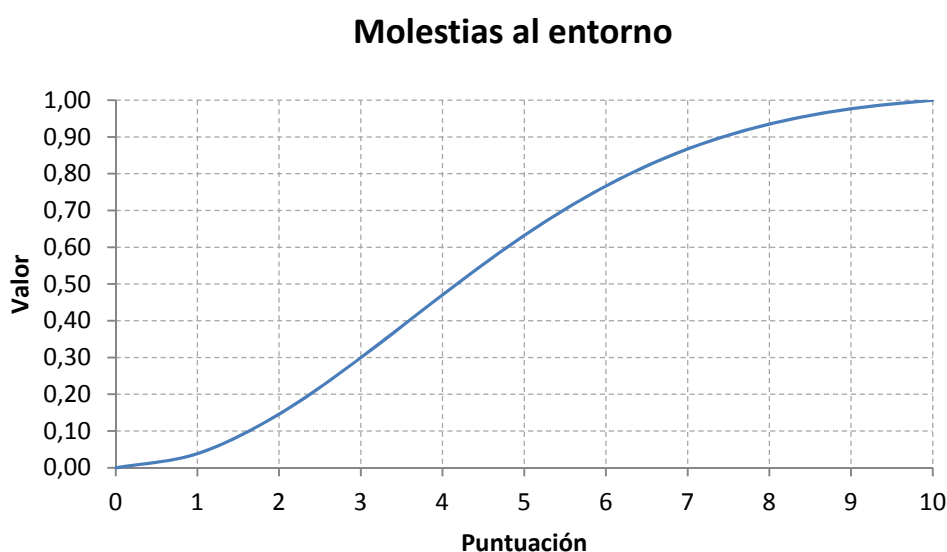


Figura 4.10: Función de valor del indicador molestias al entorno

El límite inferior de la función se considera situado en el valor 0 mientras que el límite superior es 10. Se realiza un análisis cualitativo de las molestias el resultado del cual se encontrará situado dentro del intervalo  $[0,10]$ . La función tiene una forma en S creciente. El punto de inflexión de la función se sitúa en un valor de 3,6.

#### 4.5.9. Cantidad de energía consumida

##### 4.5.9.1. Objetivo

Este indicador tiene por objetivo medir la cantidad de energía consumida en las actividades que hay que llevar a cabo para la puesta en servicio del túnel, incluyendo todas las fases de construcción de la infraestructura.

##### 4.5.9.2. Forma de valorar

El indicador resulta de la medición de la cantidad de energía en kWh empleada para la construcción de un metro de túnel. El indicador incluye todas las actividades de construcción de la infraestructura. Los valores correspondientes a la producción de los materiales se han considerado en el presente estudio.

##### 4.5.9.3. Función de valor

En la Figura 4.11 se muestra la función de valor considerada para este indicador, la cual corresponde a una función de valor de tipo decreciente convexa.

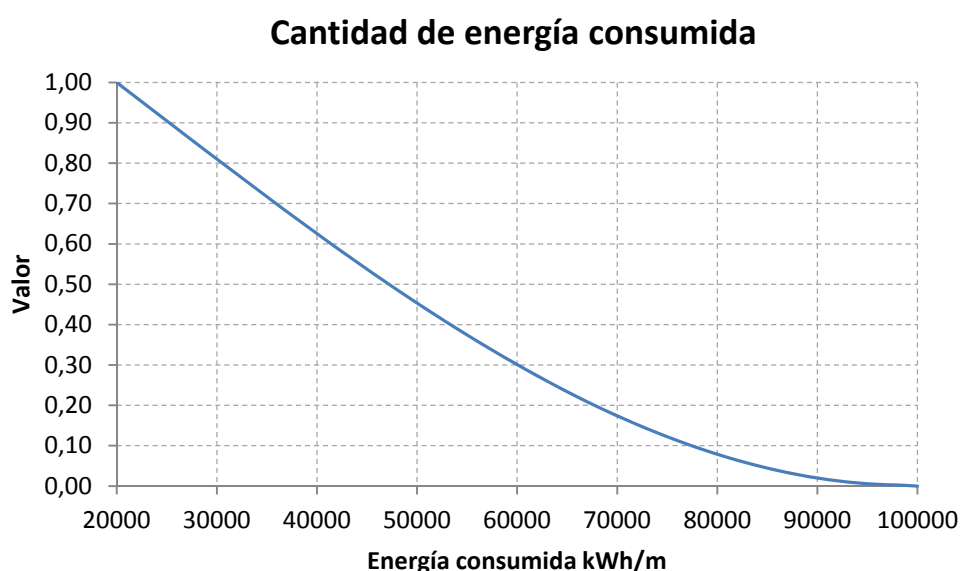


Figura 4.11: Función de valor del indicador cantidad de energía consumida.

Se estima un valor mínimo de 20.000 kWh por metro para aquellas opciones que requieren menor cantidad de energía y con una satisfacción máxima. De manera similar se propone un valor de 100.000 kWh por metro para el valor máximo. El punto de inflexión de la función se propone para 35.000 kWh por metro con el fin de favorecer las soluciones con el consumo de energía menor..

#### 4.5.10. Cantidad de hormigón consumido

##### 4.5.10.1. Objetivo

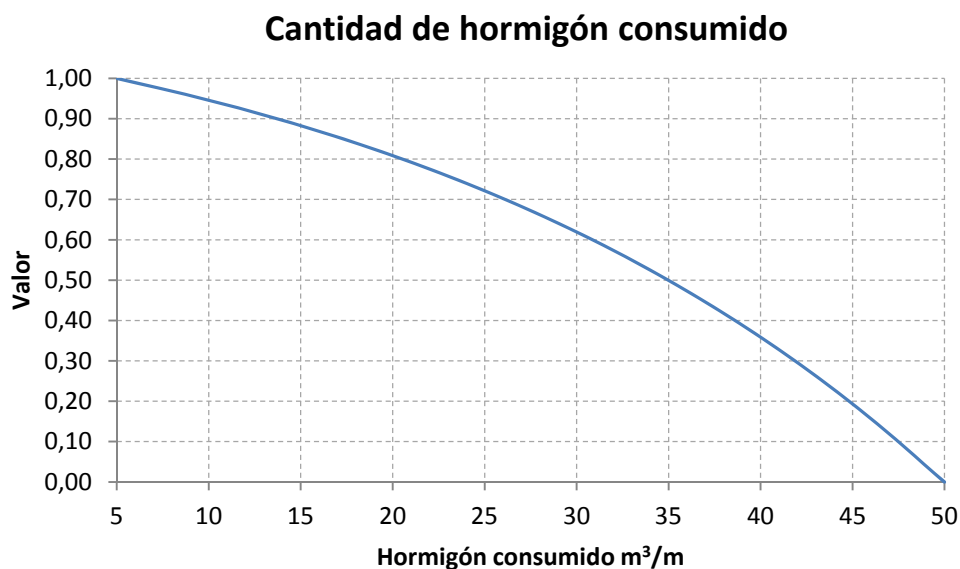
El objetivo de este indicador corresponde a cuantificar la cantidad de hormigón utilizado para la construcción del túnel. Se han considerado los valores correspondientes a cada uno de los elementos de obra civil para finalizar la estructura del túnel.

##### 4.5.10.2. Forma de valorar

El indicador se obtiene de la división de la cantidad de hormigón utilizado para la construcción de un metro de túnel ( $\text{m}^3/\text{m}$ ) para llevar a cabo la evaluación de este indicador se han considerado para la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora la cantidad de hormigón utilizado para fabricar los elementos prefabricados de las dovelas mientras que en el caso de la alternativa de túnel a cielo abierto se ha considerado el consumo de hormigón para la construcción del recinto entre pantallas con solera y cubierta.

##### 4.5.10.3. Función de valor

En la Figura 4.12 se presenta la función de valor considerada como una función cóncava decreciente.



**Figura 4.12:** Función de valor del indicador cantidad de hormigón consumido.

El valor mínimo considerado es de 5 m<sup>3</sup> por metro de túnel construido para las soluciones con menor empleo de materias primas y con una satisfacción máxima y un valor máximo de 50 m<sup>3</sup>/m de hormigón por metros de túnel. El punto de inflexión se establece en 10 m<sup>3</sup> de hormigón por metro de túnel construido.

#### 4.5.11. Cantidad de acero consumido

##### 4.5.11.1. Objetivo

Este indicador tiene por objetivo medir la cantidad de acero consumido utilizado para la ejecución de un metro de túnel. Los valores considerados corresponden a la construcción de cada uno de los elementos de obra civil para poder poner en servicio el túnel.

##### 4.5.11.2. Forma de valorar

Se obtiene el indicador de la división de la cantidad de acero utilizada para la construcción de un metro de túnel (t/m). Para llevar a cabo la evaluación de este indicador se han considerado para la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora la cantidad de acero utilizado para fabricar los elementos prefabricados de las dovelas mientras que en el caso de la alternativa de túnel a cielo abierto se ha considerado el consumo de acero para la construcción del recinto entre pantallas con solera y cubierta.

##### 4.5.11.3. Función de valor

En la Figura 4.13 se presenta la función de valor considerada como una función cóncava decreciente.

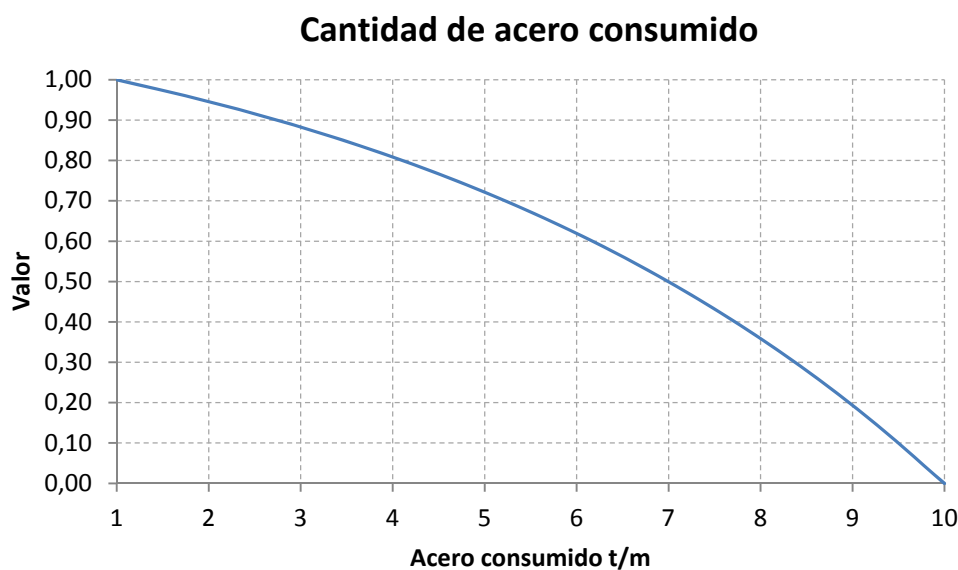


Figura 4.13: Función de valor del indicador cantidad de acero consumido.

Se considera una función con un valor mínimo de 1 tonelada por metro de túnel construido para las soluciones con menor empleo de acero y con una satisfacción máxima y un valor máximo de 10 toneladas por metro de túnel. El punto de inflexión se determina en 3 toneladas de materia prima por metro de túnel construido.

#### 4.5.12. Cantidad de CO<sub>2</sub> emitido

##### 4.5.12.1. Objetivo

El objetivo de este indicador consiste en medir la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida por el conjunto de actividades que comportan la realización del túnel que incluye su construcción.

##### 4.5.12.2. Forma de valorar

La medición de este indicador se lleva a cabo mediante la división del conjunto de las emisiones de CO<sub>2</sub> durante las distintas actividades de construcción del túnel entre los metros de longitud del túnel.

##### 4.5.12.3. Función de valor

En la Figura 4.14 se puede observar la función de valor propuesta para el indicador. La misma es de tipo cóncava decreciente con un valor mínimo de 5 toneladas por metro para soluciones que emiten poca cantidad de CO<sub>2</sub> y por tanto con una satisfacción máxima y un valor máximo de 50 toneladas por metro para soluciones que emiten una gran cantidad de CO<sub>2</sub> al medioambiente y que por tanto tendrán una satisfacción mínima.

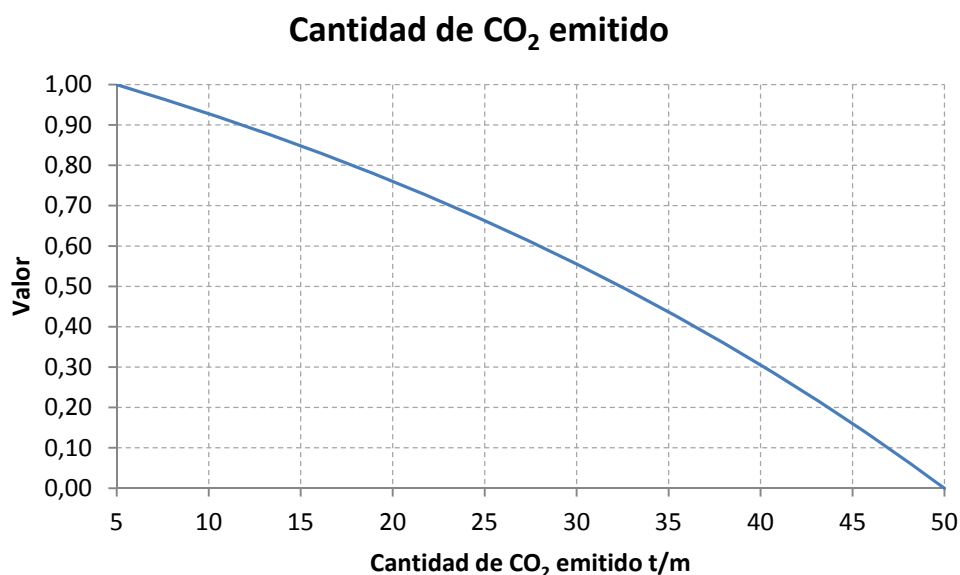


Figura 4.14: Función de valor del indicador cantidad de CO<sub>2</sub> emitido.



#### 4.5.13. Resumen de las funciones utilizadas

En el presente apartado se presenta un resumen de las funciones utilizadas a modo de recopilación. El resumen recoge los parámetros utilizados en el caso de cada uno de los indicadores utilizados. La Tabla 4.7 recopila los parámetros  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ ,  $C_i$ ,  $K_i$  y  $P_i$  de cada una de las funciones de valor consideradas en los respectivos indicadores. Se indica asimismo en la tabla la forma de la función de valor considerada.

Indicador	$X_{\min}$	$X_{\max}$	$C_i$	$K_i$	$P_i$	Forma
Coste inicial construcción	25.000	15.000	22.000	0,10	2	Convexa decrec.
Desviación del coste	100	0	50	0,15	3	En "S" decreciente
Coste mantenimiento	100	50	50	0,40	4	Convexa decrec.
Tiempo de construcción	30	10	15	0,30	3	Convexa decrec.
Desviación temporal	0	100	40	0,50	3	En "S" creciente
Molestias para productor	100	0	40	0,50	2	En "S" decreciente
Seguridad del operario	135	0	81	0,01	1	Lineal decreciente
Molestias al entorno	0	10	3,6	0,5	2	En "S" creciente
Cantidad energía consumida	100.000	20.000	35.000	0,10	2	Convexa decreciente
Cantidad de hormigón consumido	50	5	25	0,80	1	Cóncava decreciente
Cantidad de acero consumido	10	1	5	0,80	1	Cóncava decreciente
Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido	50	5	25	0,50	1	Cóncava decrec.

**Tabla 4.7:** *Tabla resumen de las funciones de valor consideradas*

#### 4.6. ASIGNACIÓN DE PESOS

El árbol de decisiones se ha presentado en el apartado anterior de este capítulo. En el presente apartado se indican los pesos asignados a cada uno de los requerimientos, criterios e indicadores del árbol de decisiones elaborado. Los pesos asignados se resumen en la Tabla 4.8.

En el caso de la presente tesina no se han llevado a cabo seminarios o encuestas para establecer los pesos de los diferentes requerimientos, criterios e indicadores. Las consideraciones y pesos establecidos corresponden únicamente a la apreciación personal del autor de la presente tesina en función de sus conocimientos y experiencia.

REQUERIMIENTO	CRITERIO	INDICADOR
ECONÓMICO Peso: 45%	Costes Peso: 60%	Coste inicial de construcción (65%)
		Desviación probable del coste (22%)
	Tiempo Peso: 40%	Coste de mantenimiento (13%)
		Tiempo de construcción (75%)
SOCIAL Peso: 22%	Efectos para el productor Peso: 40%	Desviación temporal (25%)
		Molestias para el productor (50%)
	Efectos a terceros Peso: 60%	Seguridad del operario (50%)
		Molestias al entorno (100%)
MEDIOAMBIENTE Peso: 33%	Consumos Peso: 50%	Cantidad de energía consumida (60%)
		Cantidad de hormigón consumido (20%)
		Cantidad de acero consumido (20%)
	Emisiones Peso: 50%	Cantidad CO <sub>2</sub> emitido (100%)

**Tabla 4.8: Árbol de requerimientos**

Para la asignación de los pesos de los diferentes niveles se han empleado diferentes aproximaciones. En el caso del nivel de requerimientos y de criterios se ha considerado un asignación directa de los pesos mientras que en el caso del nivel de indicadores se ha realizado una aproximación mediante la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process).

La asignación de los pesos de los requerimientos se ha establecido por comparación con el requerimiento social que se ha considerado el menos importante de los tres. A partir de esta consideración se estableció un orden creciente de importancia para los requerimientos medioambientales y económicos. El factor medioambiental se consideró ligeramente más importante que el social mientras que el requerimiento económico se consideró el más importante de los tres. Se ha establecido una relación de 1,5 entre los requerimientos social y medioambiente y de 2 entre el requerimiento social y económico.

En el caso del nivel de criterios los pesos se han establecido mediante un proceso de ponderación directo. Se han considerado únicamente dos criterios por requerimiento de manera que el proceso ha consistido en establecer la importancia relativa de cada uno de ellos.

En el caso del requerimiento económico se ha considerado una mayor importancia al criterio de costes frente al de tiempo. Se ha considerado una relación de 1,5 veces más importancia del criterio de coste. Se ha establecido un peso del 60% al criterio de Costes y un peso del 40% para el criterio de tiempo.

En el caso del requerimiento social se ha considerado una mayor importancia de los efectos a terceros frente a los efectos para el productor con una relación de 1,5. Para este requerimiento se establece finalmente unos pesos del 40% para los efectos para el productor y del 60% para los efectos a terceros.

Finalmente en el caso del requerimiento medioambiente se considera una importancia similar a los consumos y a las emisiones por lo que se establecen unos peso del 50% para ambos criterios.

El establecimiento de los pesos del nivel de indicadores se ha llevado cabo mediante la metodología AHP que establece la comparación por pares para el cálculo de los mismos. Esta metodología habitualmente utilizada para la asignación de pesos en MIVES se basa en una comparación de un grupo de aspectos considerados como homogéneo como pueden ser los indicadores de un mismo criterio o los criterios de un mismo requerimiento entre sí. A partir de estas comparaciones se establece una matriz de comparación por pares que permite calcular el vector pesos y la consistencia de los mismos.

Esta matriz de comparación por pares presenta una forma de matriz cuadrada  $n \times n$ , siendo  $n$  el número de elementos comparados entre si (indicadores, criterios o requerimientos). Los valores que toman cada uno de los elementos de la matriz se establecen de acuerdo con una escala en función de la importancia relativa en cada una de las comparaciones 2 a 2. Los valores de los elementos de la matriz para la comparación por pares se encuentran recogidos en la tabla 4.9.

Importancia relativa	Significado (i respecto j)	Elemento de la matriz	
		$a_{ij}$	$a_{ji}$
$\frac{1}{9}$	Absolutamente o extremadamente menos preferido	$\frac{1}{9}$	9
$\frac{1}{7}$	Mucho menos importante o preferido	$\frac{1}{7}$	7
$\frac{1}{5}$	Menos importante o preferido	$\frac{1}{5}$	5
$\frac{1}{3}$	Ligeramente menos importante o preferido	$\frac{1}{3}$	3
1	Igual importancia	1	1
Valores intermedios: 2, 4, 6, 8			

**Tabla 4.9:** Comparación por pares para el cálculo de pesos mediante AHP

En el caso del criterio de costes se ha considerado una relación entre el coste inicial de construcción y la probabilidad de desviación del coste de 3, entre el coste inicial de construcción y el coste de mantenimiento de 5 y entre la probabilidad de desviación del coste y el coste de mantenimiento de 2. La matriz de pesos se recoge en la Tabla 10.

	<b>Coste inicial de construcción</b>	<b>Probabilidad de desviación del coste</b>	<b>Coste de mantenimiento</b>
Coste inicial de construcción	1	3,00	5,00
Desviación probable del coste	0,33	1	2,00
Coste de mantenimiento	0,20	0,50	1

**Tabla 4.10: Matriz de pesos para los indicadores del criterio de costes**

Los pesos obtenidos para cada uno de los indicadores del criterio de costes son de 65,22 % en el caso del coste inicial de construcción, de 21,74% en el caso de la desviación probable del coste y del 13,04 % en el caso del coste de mantenimiento. Estos valores presentan un índice de consistencia de 0,00.

En el caso del criterio de tiempo se ha considerado una relación entre los dos indicadores con una relación de 3 siendo ligeramente menos importante o preferido el indicador de desviación temporal respecto del tiempo de construcción. Los pesos de los indicadores para este criterio son del 75 % para el indicador de tiempo de construcción y del 25 % para el indicador desviación temporal.

Para el criterio efectos para el productor del requerimiento social se ha considerado una importancia igual para los indicadores de molestias para el productor y seguridad del operario. Los pesos de ambos indicadores son del 50 %.; mientras que en el caso del criterio de efectos a terceros dentro del requerimiento social únicamente se ha considerado un indicador que presenta un peso del 100 %.

Para el criterio de consumos del requerimiento medioambiente se consideran tres indicadores. Se ha considerado el consumo de energía ligeramente más importante que el consumo de acero y de hormigón con una relación de 3. En el caso del consumo de materiales se ha considerado una importancia igual para ambos indicadores. La matriz para la obtención de los pesos relativos se recoge en la tabla 4.11. Los pesos relativos de cada uno de los indicadores corresponden a 60% en el caso de la Cantidad de energía consumida, el 20% en el caso de la cantidad de hormigón consumido y del 20% en el caso de la cantidad de acero consumido.

<b>Cantidad de:</b>	<b>Energía consumida</b>	<b>Hormigón consumido</b>	<b>Acero consumido</b>
Energía consumida	1	3,00	3,00
Hormigón consumido	0,33	1	1,00
Acero consumido	0,33	1,00	1

**Tabla 4.11: Matriz de pesos para los indicadores del criterio de consumos**

## 5. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En capítulo anterior se ha expuesto la metodología MIVES que emplearemos para la toma de decisión basada en un análisis de valor que permita discriminar las alternativas consideradas en el presente estudio. En el capítulo 4 se ha definido el árbol de decisión construido para poder aplicar la metodología propuesta y se han definido asimismo las funciones que nos servirán para valorar cada uno de los indicadores escogidos.

El presente capítulo recoge la aplicación de la metodología y la estructura de decisión construida a las dos alternativas consideradas para la ejecución de un túnel con tuneladora o a cielo abierto. Esta aplicación práctica del análisis multicriterio desarrollado corresponde a una aplicación simplificada en que se realizan estimaciones de los parámetros considerados a partir de los datos e información disponible en el momento de realización de la presente tesina. Asimismo los resultados obtenidos dependen de las condiciones actuales en el momento de redacción de la tesina, por lo que en caso de cambiar estas en el tiempo el resultado se vería también modificado.

Los valores que se han considerado para la evaluación de los diferentes indicadores se han basado en la información recopilada y la apreciación personal del autor de la presente tesina en base a sus conocimientos. En algunos casos se ha recurrido a valores obtenidos en otra tesina o en referencias bibliográficas o datos de entidades del sector.

El capítulo comprende tres apartados en los que se describe la evaluación de las alternativas, la respuesta de las mismas para cada uno de los indicadores y el cálculo final del valor de cada una de las dos alternativas consideradas. Los resultados obtenidos constituyen el objetivo esencial de la presente tesina y sirven de base para la elaboración de las conclusiones obtenidas.

## 5.2. EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

A partir del planteamiento descrito del modelo MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles) descrito en capítulo anterior de la presente tesina se ha realizado una evaluación de las alternativas consideradas. El enfoque llevado a cabo corresponde a una evaluación de ambas alternativas con la totalidad de sus componentes de manera que se obtiene una puntuación global de las mismas que denominaremos valor de cada alternativa.

El análisis llevado a cabo siguiendo las pautas descritas en el capítulo 3 de la presente tesina. Las alternativas consideradas han sido la construcción del túnel mediante tuneladora y la construcción del mismo mediante excavación a cielo abierto.

### 5.2.1. Ponderación de pesos

El proceso de ponderación implica la asignación de los pesos a las distintas variables de un mismo grupo. La ponderación de los pesos debe de realizarse para cada uno de los niveles de la estructura considerados, en nuestro caso a nivel de requerimientos, criterios e indicadores de forma separada. La asignación de pesos permite establecer una jerarquización para el nivel de importancia para cada uno de los elementos considerados.

En capítulo anterior se han descrito los diversos procedimientos que de forma usual se emplean para la asignación de las ponderaciones a las variables consideradas. En nuestro caso se ha optado por una asignación directa en el caso de los niveles correspondientes a requerimientos y criterios mientras que en el caso del nivel de indicadores se ha aplicado la asignación mediante la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process o Proceso Jerárquico Analítico).

Los resultados obtenidos del análisis de ponderación de pesos se recogen en el apartado 4.5 del capítulo anterior. Los resultados del procedimiento realizado se recogen en la tabla 5.1 donde se muestra la matriz para los requerimientos, criterios e indicadores que se han considerado en el capítulo anterior.

REQUERIMIENTO	PESO	CRITERIO	PESO	INDICADOR	PESO
ECONÓMICO	45%	Costes	60%	Coste inicial de construcción	65%
				Desviación del coste	22%
				Coste de mantenimiento	13%
		Tiempo	40%	Tiempo de construcción	75%
				Desviación temporal	25%
SOCIAL	22%	Efectos para el productor	40%	Molestias para el productor	50%
				Seguridad del operario	50%
		Efectos a terceros	60%	Molestias al entorno	100%
MEDIOAMBIENTE	33%	Consumos medidos en cantidad de:	50%	Energía consumida	60%
				Hormigón consumido	20%
				Acero consumido	20%
		Emisiones	50%	Cantidad CO <sub>2</sub> emitido	100%

**Tabla 5.1:** Valores de pesos de ponderación para el árbol de requerimientos

### 5.2.2. Funciones de valor

Se ha llevado a cabo también una asignación de funciones de valor a los diferentes indicadores representados en el árbol de valor. En el capítulo 4 se ha llevado a cabo una descripción y representación de cada una de las funciones de valor asignadas a cada una de las variables. En este apartado y a modo de resumen se presenta en la tabla 5.2 los valores de los parámetros y las características de cada una de las funciones de valor consideradas.

## 5.3. RESPUESTAS DE LAS ALTERNATIVAS

Las respuestas de las alternativas en cada uno de los indicadores se han obtenido a partir de las estimaciones y análisis específicos llevados a cabo para la presente tesina.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora una parte de los valores considerados (coste, desviación del coste, plazo de ejecución) proceden de los resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo desarrollada por Ignacio Sáenz de Santamaría Gatón (2007) en su tesina “Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles mecanizados”.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto se ha llevado a cabo en primer lugar un cálculo de la solución del recinto entre pantallas con el fin de dimensionar una solución construible. A partir de los resultados de este análisis se ha procedido a la realización de un presupuesto completo de la solución mediante el programa TCQ basándose en el banco de precios de Infraestructures.cat que corresponde a la entidad que usualmente

licita este tipo de obras y lleva a cabo su seguimiento en la zona de Barcelona. Asimismo se ha llevado a cabo una estimación del plazo de ejecución de la solución a partir de los rendimientos considerados en el banco de precios citado mediante la confección de un plan de ejecución de la obra.

Indicador	$X_{\min}$	$X_{\max}$	$C_i$	$K_i$	$P_i$	Forma
Coste inicial construcción [€/m túnel]	25.000	15.000	22.000	0,10	2	Convexa decreciente
Desviación del coste [% desviación]	100	0	50	0,15	3	En "S" decreciente
Coste de mantenimiento [€/m túnel]	100	50	50	0,40	4	Convexa decreciente
Tiempo de construcción [meses]	30	10	15	0,30	3	Convexa decreciente
Desviación temporal [puntuación]	0	100	40	0,50	3	En "S" creciente
Molestias para el productor [puntuación]	100	0	40	0,50	2	En "S" decreciente
Seguridad del operario [evaluación riesgos]	135	0	81	0,01	1	Lineal decreciente
Molestias al entorno [puntuación]	0	10	3,6	0,5	2	En "S" creciente
Cantidad de energía consumida [kWh/m túnel]	100.000	20.000	35.000	0,10	2	Convexa decreciente
Cantidad de hormigón consumido [m <sup>3</sup> /m túnel]	50	5	25	0,80	1	Cóncava decreciente
Cantidad de acero consumido [t/m túnel]	10	1	5	0,80	1	Cóncava decreciente
Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido [t/m túnel]	50	5	25	0,50	1	Cóncava decreciente

**Tabla 5.2:** Tabla resumen de las funciones de valor consideradas y sus parámetros

Para el resto de los requerimientos, criterios e indicadores se han establecido en base a referencias o se han considerado caso de existir las normativas existentes de aplicación.

En la tabla 5.3 se muestra de forma sistemática y para cada uno de los indicadores considerados en la presente tesina las respuestas para cada una de las alternativas. La tabla muestra la respuesta del indicador para cada alternativa y el correspondiente índice de valor asociado del indicador correspondiente. En los siguientes apartados que siguen se exponen con mayor detalle la forma de obtención de las respuestas obtenidas.



Indicador	Alternativa túnel con tuneladora		Alternativa túnel a cielo abierto	
	Respuesta	Iv	Respuesta	Iv
Coste inicial construcción [€/m túnel]	22.305	0,27	22.803	0,23
Desviación del coste [% desviación]	12,2	0,80	20,0	0,66
Coste de mantenimiento [€/m túnel]	55,17	0,69	57,01	0,60
Tiempo de construcción [meses]	11	0,87	25	0,00
Desviación temporal [puntuación]	85	0,99	55	0,73
Molestias para el productor [puntuación]	30	0,82	55	0,49
Seguridad del operario [evaluación riesgos]	71	0,48	55	0,59
Molestias al entorno [puntuación]	10	1,00	2,85	0,17
Cantidad de energía consumida [kWh/m túnel]	31.293	0,79	95.041	0,00
Cantidad de hormigón consumido [m <sup>3</sup> /m túnel]	8,8	0,96	46,0	0,16
Cantidad de acero consumido [t/m túnel]	1,5	0,97	5,6	0,66
Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido [t/m túnel]	14,97	0,85	41,18	0,27

**Tabla 5.3:** Tabla con los índices de valor de cada indicador para las alternativas consideradas

## 5.4. REQUERIMIENTO ECONÓMICO

El requerimiento económico incluye dos criterios que corresponden a costes y tiempo. En ambos casos los criterios incluyen más de un indicador. El peso del requerimiento económico es del 45%.

### 5.4.1. Criterio costes

Por lo que respecta al criterio de costes se han incluido bajo este epígrafe tres indicadores relacionados con aspectos económicos de las alternativas. Los indicadores considerados corresponden al coste inicial de construcción, la probabilidad de desviación del coste y al coste de mantenimiento. El peso del criterio costes es del 60% del requerimiento económico.

#### 5.4.1.1. Coste inicial de construcción

En este indicador se considera el coste inicial de construcción del túnel para cada una de las alternativas consideradas. El peso del indicador es del 65% del criterio costes.

En el caso de la alternativa correspondiente al túnel realizado mediante tuneladora el coste se ha estimado a partir de los datos obtenidos mediante la hoja desarrollada por Ignacio Sáenz de Santamaría en su tesina (2007) “Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles mecanizados”. Los resultados del análisis realizado mediante la herramienta facilitados por el autor se obtiene para la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora un coste total de 57.375.021,43€ (57,4 M€). Este valor dividido por la

longitud total del túnel de 2.600 m da como resultado un coste de 22.067 €/m de túnel ejecutado. Finalmente hemos añadido el coste del desplazamiento de la tuneladora en los tramos de estación para obtener un valor final de 22.305 €/m de túnel ejecutado para la alternativa de túnel con tuneladora.

En el caso de la alternativa de construcción del túnel a cielo abierto se ha llevado a cabo la definición de una solución mediante recintos entre pantallas con tres niveles de anclajes. Esta solución se ha dimensionado y posteriormente se ha llevado a cabo un presupuesto de ejecución del túnel en el tramo estudiado. El presupuesto se ha realizado tomando como base el banco de precios de obra civil de la entidad Infraestructures.cat del año 2015. El importe final del presupuesto para esta alternativa ha sido de 59.287.361,03€. Este valor dividido por la longitud total del túnel de 2.600 m da como resultado un coste de 22.803 €/m de túnel ejecutado.

En ambos casos comparamos costes de ejecución material de las alternativas. Los resultados de los análisis del coste realizados para ambas alternativas se recogen en un anejo al final del presente documento.

#### *5.4.1.2. Desviación probable del coste*

El indicador considera la desviación probable del coste para la ejecución del túnel. La valoración de este indicador incluye aspectos relacionados con el coste como cambios en el coste de la energía o materias primas o desviaciones debidas a modificaciones del proyecto. El peso del indicador es del 22% de criterio costes.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora se ha partido de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la tesina de Ignacio Sáenz de Santamaría (2007). El análisis realizado por la aplicación incluye una estimación del coste normal de manera que puede determinarse para las condiciones de la obra a ejecutar el coste máximo para un determinado nivel de confianza. En nuestro caso se ha estimado un coste máximo de 64,4 M€ con un nivel de confianza del 95%. A partir de este valor se ha determinado una desviación probable del coste del 12,2% para la alternativa del túnel ejecutado mediante tuneladora.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto no se dispone de un análisis similar de la desviación probable del coste de construcción. Se ha considerado que la alternativa de ejecución a cielo abierto presenta algunas incertidumbres en el coste final debido a los condicionantes geotécnicos al tratarse de materiales sueltos con poca o nula cohesión saturados por debajo del nivel freático que se encuentra relativamente elevado. Se ha considerado un valor del 20% en la desviación del coste de construcción ya que este corresponde al límite a partir del cual se puede considerar que se produce una desviación económica importante para el proyecto. El umbral del 20% de desviación del coste en el presupuesto ha sido considerado hasta las modificaciones recientes en legislación de

contratación de las administraciones públicas la cuantía de referencia para poder tramitar un procedimiento simplificado de modificación del contrato inicial.

#### 5.4.1.3. Coste de mantenimiento

En el caso de este indicador se considera el coste de mantenimiento anual por metro de túnel. El peso del indicador es del 13% del criterio costes.

Se ha partido de la consideración de que el coste de la construcción de un túnel en condiciones de obra civil con dificultades representa el 80% mientras que los costes de explotación del túnel representan el 20% restante. Los costes de explotación de un túnel incluyen los costes ordinarios de explotación (5,5%) los costes de grandes reparaciones (8,5%) y los costes actuales ordinarios de mantenimiento (6%). Este último término es el que se ha considerado en el presente estudio para estimar el coste de mantenimiento de la infraestructura.

En la Figura 5.1 se muestra el desglose de costes para un periodo de treinta años desde la puesta en servicio del túnel.



**Figura 5.1: Desglose de costes en túneles para un periodo de 30 años (Fuente: Piarç).**

En el caso de la alternativa de túnel ejecutado mediante tuneladora a partir del coste estimado de construcción y considerando un período de 30 años se ha determinado un coste de mantenimiento de 55,17 €/m de túnel y año. En el caso de la alternativa de túnel a cielo abierto se ha determinado un coste de mantenimiento de 57,01 €/m de túnel y año. Estos valores se encuentran dentro del rango de 50 a 100 €/m de túnel y año que se han considerado inicialmente para la función de valor del indicador.

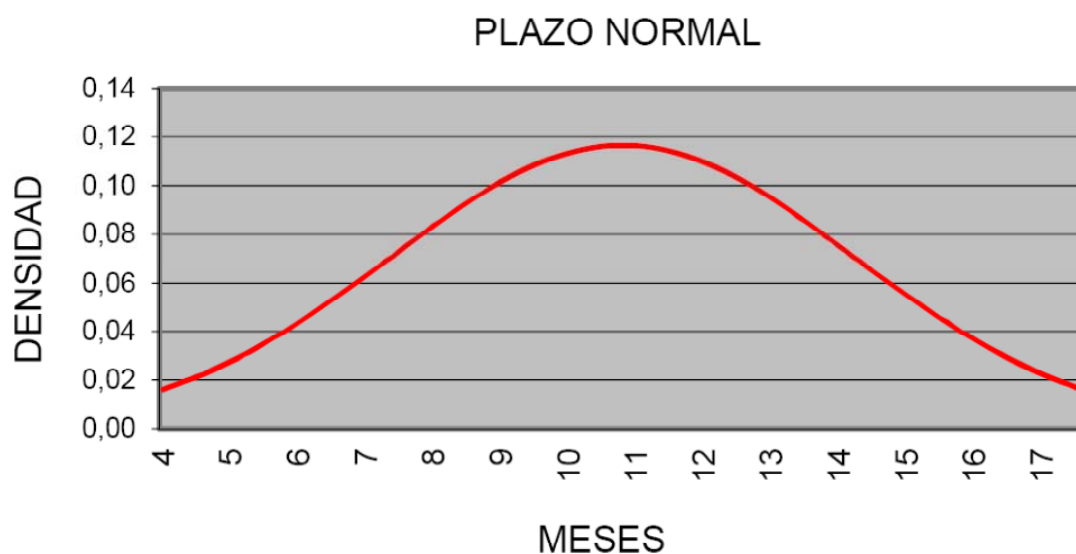
#### 5.4.2. Criterio tiempo

El criterio tiempo considera dos indicadores que corresponden al tiempo de construcción y a la desviación temporal de la ejecución de la infraestructura. El peso del criterio tiempo es del 40% del requerimiento económico. El peso del criterio tiempo es del 40% del requerimiento económico.

#### 5.4.2.1. Tiempo de construcción

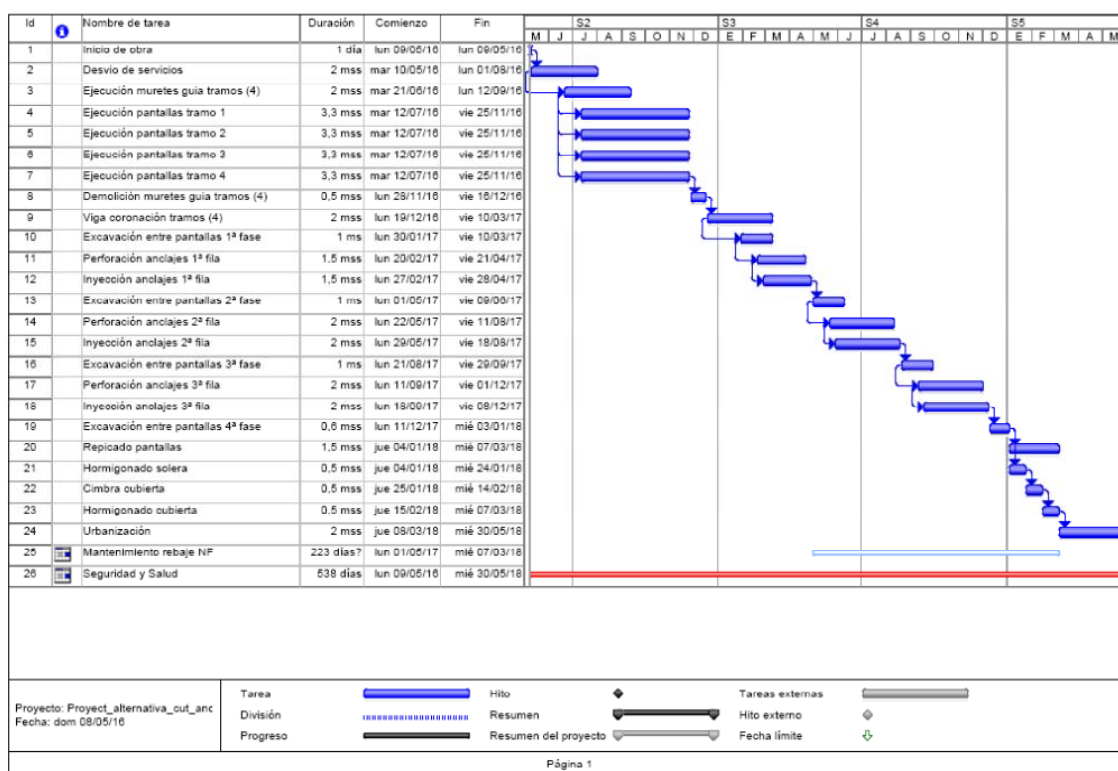
En este indicador se considera el tiempo en meses que se emplea para la construcción del túnel en el tramo considerado. Este indicador tiene un peso del 75% del criterio tiempo.

En el caso de la alternativa de túnel ejecutado mediante tuneladora se han utilizado los resultados obtenidos de la estimación que lleva a cabo la herramienta desarrollada por Ignacio Sáenz de Santamaría (2007). El análisis realizado estima una duración total para el conjunto del tramo de 11 meses. En la Figura 5.2 se muestra la distribución de densidad del plazo normal de ejecución.



**Figura 5.2:** Plazo normal de ejecución de la alternativa de túnel ejecutado mediante tuneladora (Elaborado mediante la aplicación desarrollada en su tesina por Ignacio Sáenz de Santamaría).

En el caso de la alternativa de túnel ejecutado a cielo abierto se ha llevado a cabo un cálculo de la duración de los trabajos a partir de los rendimientos y producciones con los que se ha elaborado el presupuesto de la alternativa. A partir de los valores estimados de duración de las actividades en función del número de equipos empleados se ha procedido a la elaboración de un plan de obra que finalmente se ha traducido en una duración total para el conjunto del tramo de 25 meses. En la Figura 5.3 se muestra el plan de obra elaborado para la alternativa de túnel excavado a cielo abierto.



**Figura 5.3: Plan de obra realizado de la alternativa de túnel ejecutado a cielo abierto.**

Los resultados de la estimación del plazo correspondientes a la alternativa mediante tuneladora se encuentran recogidos en el anejo A. Los resultados del plan de obra realizado para la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto se recogen en el anejo D.

#### 5.4.2.2. Desviación temporal

El indicador tiene como objetivo la valoración de la desviación del plazo de ejecución del túnel respecto de las previsiones iniciales. Incluye consideraciones sobre las condiciones climáticas adversas, geotécnicas y de conflictividad laboral. Este indicador tiene un peso del 25% del criterio tiempo.

El indicador se ha valorado considerando 4 aspectos o parámetros. Los parámetros se evalúan a través de puntuaciones las cuales varían en función de la capacidad de respuesta de la alternativa considerada. En la tabla 5.4 se presentan los parámetros considerados con la puntuación asociada al cumplimiento de los mismos así como la puntuación de cada una de las dos alternativas consideradas.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora se ha asignado un valor de 25 puntos al parámetro del grado de independencia frente a las condiciones climáticas al tratarse de una excavación subterránea. Para este parámetro en el caso de la alternativa a cielo abierto se considera un grado intermedio de dependencia ya que las actividades principales pueden verse afectadas al tratarse de una ejecución al aire libre.

Parámetro	Cumplimiento	Puntuación	Puntos	
			Alternativa tuneladora	Alternativa Cielo abierto
Grado de independencia de la alternativa frente a las condiciones climáticas	Totalmente dependiente	0	25	10
	Grado intermedio de dependencia	10		
	Totalmente independiente	25		
Grado de independencia de la alternativa frente a las condiciones geotécnicas	Totalmente dependiente	0	10	10
	Grado intermedio de dependencia	10		
	Totalmente independiente	25		
Suministro de materiales	Fallo constante del suministro	0	25	10
	Fallo temporal del suministro	10		
	Fallo puntual del suministro	25		
Capacidad técnica de las contratas	Falta de capacidad en el sistema constructivo	0	25	25
	Conocimientos básicos del sistema constructivo	10		
	Especialistas en el sistema constructivo	25		
Puntuación total de la alternativa			85	55

**Tabla 5.4:** Puntuaciones para las alternativas del indicador de desviación temporal

Respecto al parámetro de dependencia de la alternativa frente a condiciones geotécnicas en ambos casos se ha considerado un grado intermedio de dependencia al tratarse de soluciones que pueden verse afectadas por los condicionantes geotécnicos especialmente si se considera el tipo de suelo presente en la zona (arenas sueltas a medias) y la existencia de nivel freático a escasa profundidad.

El parámetro de suministro de materiales en el caso de la alternativa de túnel ejecutado con tuneladora se considera únicamente un fallo puntual de suministro ya que se suele realizar acopio de dovelas en la zona de ataque de los túneles ejecutados con tuneladora ya que la ejecución mediante esta técnica requiere un suministro constante de las mismas. En el caso de la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto se ha considerado un fallo temporal en el suministro ya que el suministro de hormigón in situ para las pantallas requiere de un suministro garantizado del mismo durante la fase de hormigonado. Este factor junto al

emplazamiento en zona urbana han llevado a considerar posibles problemas temporales del suministro.

Finalmente respecto del parámetro correspondiente a la capacidad técnica de las contratas por el tipo de trabajo especializado del que se trata se ha considerado en ambos casos que los contratistas corresponden a especialistas en el sistema constructivo considerado.

Para este indicador finalmente se obtiene una puntuación de 85 puntos en el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora y de 55 puntos en el caso de la alternativa de la ejecución del túnel a cielo abierto.

## 5.5. REQUERIMIENTO SOCIAL

El requerimiento social incluye una doble vertiente de los efectos que la ejecución de la obra puede llegar a tener sobre las personas y el entorno. En primer lugar se considera los efectos que sobre el productor tiene la ejecución del túnel mientras que por otra parte se consideran los efectos a terceros puedan llegar a producirse. El peso para el requerimiento social es del 22%.

### 5.5.1. Criterio efectos para el productor

Bajo el epígrafe de este requerimiento se incluyen dos indicadores que corresponden a las molestias para el productor y la seguridad del operario. El peso del criterio efectos para el productor es del 40% del requerimiento social.

#### 5.5.1.1. Molestias para el productor

El indicador molestias para el productor nos permite considerar aquellos aspectos que pueden derivar en alguna enfermedad de tipo laboral por exposición a ambientes o agentes con riesgos asociados. Este indicador tiene un peso del 50% del criterio efectos para el productor.

Para la valoración de este indicador se han considerado un sistema de puntuación con cuatro aspectos o parámetros asociados. Los parámetros considerados han sido los ambientes con polvos, el contacto de la piel con el hormigón, la exposición al ruido y vibraciones así como la exposición a condiciones climáticas extremas. La puntuación asociada a los cuatro parámetros considerados y la correspondiente a cada una de las dos alternativas consideradas se recoge en la tabla 5.5.

Parámetro	Nivel de riesgo	Puntuación	Puntuación	
			Alternativa tuneladora	Alternativa cielo abierto
Ambientes con polvo	Riesgo bajo o nulo	0	10	10
	Riesgo medio	10		
	Riesgo alto	25		
Contactos de la piel con el hormigón	Riesgo bajo o nulo	0	10	25
	Riesgo medio	10		
	Riesgo alto	25		
Exposición al ruido y vibraciones	Riesgo bajo o nulo	0	10	10
	Riesgo medio	10		
	Riesgo alto	25		
Exposición a condiciones climáticas extremas	Riesgo bajo o nulo	0	0	10
	Riesgo medio	10		
	Riesgo alto	25		
Puntuación total de la alternativa			30	55

**Tabla 5.5:** Puntuaciones para las alternativas del indicador de las molestias para el productor

El primer parámetro considerado corresponde a la existencia de ambientes con polvo que pueden derivar en problemas respiratorios. El parámetro se considera que presenta un riesgo similar en ambas alternativas ya que en el caso de la alternativa de excavación mediante tuneladora a pesar de que la generación de polvo se espera menor el hecho de trabajar en un ambiente cerrado con necesidades de ventilación puede conducir a situaciones con ambientes pulvúgenos.

El parámetro correspondiente al contacto de la piel se ha considera en el caso de la alternativa de perforación del túnel mediante tuneladora un riesgo medio del mismo al tratarse de un proceso de montaje de piezas de hormigón prefabricado que posteriormente son inyectadas en el trasdós mediante lechada. La alternativa de excavación a cielo abierto presenta por el contrario en la mayoría de las actividades una exposición al contacto con el hormigón lo que comporta un riesgo alto.

En el caso del parámetro correspondiente a la exposición al ruido y las vibraciones que puedan inducir hipoacusia o sordera profesional se ha considerado para ambas alternativas una exposición al riesgo de tipo medio. En el caso de la alternativa de excavación mediante tuneladora predominará la exposición a las vibraciones mientras que en el caso de la alternativa de excavación a cielo abierto predominará la exposición al ruido.

Finalmente en el caso del parámetro correspondiente a las condiciones climáticas se considera un riesgo de exposición bajo en el caso de la alternativa realizada mediante tuneladora y un riesgo medio en el caso de la alternativa de excavación a cielo abierto.



Para este indicador finalmente se obtiene una puntuación de 30 puntos en el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora y de 55 puntos en el caso de la alternativa de la ejecución del túnel a cielo abierto.

#### 5.5.1.2. Seguridad del operario

El indicador seguridad del operario se ha definido con el fin de evaluar el riesgo de sufrir accidentes por parte del trabajador involucrado en la ejecución de las obras. Este indicador tiene un peso del 50% del criterio efectos para el productor.

La evaluación de la seguridad se ha basado en un análisis de riesgos basado en la clasificación de riesgos laborales del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene (INSH) que contempla 27 riesgos de accidentes considerando su probabilidad y gravedad (evaluación de 1 a 5 para cada riesgo identificado). A partir de la evaluación de los riesgos identificados se obtiene finalmente un índice que puede estar situado (a nivel teórico) entre 0 y 135.

En el caso de la alternativa de excavación del túnel mediante tuneladora se ha obtenido un índice de 71 mientras que en el caso de la alternativa correspondiente a la excavación a cielo abierto se ha obtenido del análisis un índice de 55.

#### 5.5.2. Criterio efectos a terceros

El criterio de efectos a terceros incluye únicamente el indicador molestias al entorno. El peso de este criterio dentro del requerimiento social es del 60%.

El indicador *Molestias al entorno* valora las molestias que sobre el entorno produce la ejecución de las obras en la zona próxima a estas. Este indicador tiene un peso del 100% del criterio efectos a terceros. El indicador se basa para su evaluación en tres variables o parámetros correspondientes a diferentes tipos de molestias. Estas variables corresponden a las molestias acústicas, las molestias a los transeúntes y las molestias al tráfico. En la tabla 5.6 se recogen los valores asignados a cada una de las tres variables asignadas así como la puntuación considerada para cada una de las dos alternativas consideradas.

La primera molestia considerada corresponde a la molestia ocasionada por el nivel de ruido de la obra. Esta molestia se encuentra ponderada por un peso del 70% ya que corresponde a la molestia que produce una alteración más incomoda sobre terceros. En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora se ha considerado un nivel bajo de ruidos al tratarse de una alternativa que implica una excavación subterránea. En el caso de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto se considera un nivel medio de ruido debido a las fases de ejecución de pantallas y excavación.

En el caso de las molestias a los transeúntes para la alternativa de excavación mediante tuneladora se considera una afectación nula al tratarse de una excavación subterránea. Para la alternativa de excavación a cielos abierto se considera la posibilidad de que se produzcan afectaciones a las aceras de forma parcial.

MOLESTIA	PESO	ALTERNATIVA	CONSECUENCIA	PUNTUACIÓN	
				Alternativa tuneladora	Alternativa cielo abierto
Molestias acústicas	70%	Nivel nulo	Nivel bajo de ruido	10	3
		Nivel medio	Nivel medio de ruido		
		Nivel alto	Nivel alto de ruido		
Molestias a los transeúntes	15%	Nivel nulo	Nula afectación	10	5
		Nivel medio	Acera parcialmente intervenida		
		Nivel alto	Acera cortada		
Molestias al tráfico	15%	Nivel nulo	Nula afectación	10	0
		Nivel medio	Corte parcial de calle		
		Nivel alto	Corte total de calle		
Puntuación total de la alternativa ponderada				10	2,85

**Tabla 5.6:** Puntuaciones para las alternativas del indicador de molestias al entorno

Para el caso de las molestias al tráfico se ha considerado una nula afectación en el caso de la alternativa de excavación del túnel mediante tuneladora al tratarse de una excavación subterránea. En el caso de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto se considera un nivel alto de molestia al tráfico al tratarse de cortes totales de calle durante la ejecución de las pantallas y excavación de los recintos entre pantallas a cielo abierto.

A partir de las consideraciones realizadas y los pesos parciales de los tres tipos de molestias consideradas se obtiene finalmente una puntuación ponderada para este indicador de 10 en el caso de la alternativa de excavación del túnel mediante tuneladora y de 2,85 en el caso de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto.

## 5.6. REQUERIMIENTO MEDIOAMBIENTE

El requerimiento medioambiente incluye un análisis de los consumos y las emisiones. Cada uno de estos aspectos da lugar a un criterio incluido bajo este requerimiento. El peso para el requerimiento social es del 33%.

### 5.6.1. Criterio consumos

El criterio de consumos recoge los aspectos medioambientales relacionados con el consumo ya sea de energía como de materiales (indicadores cantidad de hormigón consumido y cantidad de acero consumido). El peso del criterio consumos es del 50% del requerimiento medioambiente.

### ***5.6.1.1. Cantidad de energía consumida***

El indicador se ha establecido con el fin de evaluar la cantidad de energía consumida en el conjunto de actividades de construcción del túnel. Este indicador tiene un peso del 60% del criterio consumos.

Se ha llevado a cabo una estimación de la energía consumida a partir de los datos medioambientales procedentes del banco de precios de infraestructures.cat editados por ITEC. Los datos ambientales incluyen el coste energético de generación de las partidas de obra consideradas en el presupuesto. La multiplicación de los datos ambientales unitarios por las mediciones de cada unidad de obra da como resultado un valor global de energía consumida en kWh. Finalmente la división de esta cantidad global por la longitud del tramo de túnel nos aporta el dato de la energía en kWh consumida por metro de túnel.

En el caso de la alternativa correspondiente a la ejecución del túnel mediante tuneladora se ha considerado una estimación del consumo de energía de la tuneladora basándose en la potencia nominal de la máquina tuneladora de 9,4 m con las mismas características que la empleada en el caso del tramo 1 de la L9 de Barcelona (3.600 kW) y el plazo de ejecución (11 meses) se obtiene un consumo de 10.966 kWh/m de túnel. La producción del acero necesario para la construcción del anillo de dovelas reporta 15.662 kWh/m de túnel adicionales mientras que la producción del hormigón de los mismos elementos aporta 4.665 kWh/m de túnel adicionales. Finalmente para la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora se obtiene un valor de 31.293 kWh/ m de túnel.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante excavación a cielo abierto se aplica el procedimiento expuesto de considerar los valores de coste energético procedentes del banco de precios de infraestructures.cat considerando el conjunto de mediciones del presupuesto elaborado para esta alternativa. Una vez realizado el proceso de cálculo se obtiene un valor global de energía consumida de 247.106.827,57 kWh. Esta cantidad global de energía consumida considerando la longitud del túnel de 2.600 m se traduce en un valor de 95.041 kWh/m de túnel.

### ***5.6.1.2. Cantidad de hormigón consumido***

El indicador permite cuantificar la cantidad de hormigón utilizado para poder realizar la construcción del túnel. Este indicador tiene un peso del 20% del criterio consumos.

Para llevar a cabo la valoración de la cantidad de hormigón consumido se ha considerado los valores correspondientes a cada uno de los elementos de hormigón que se requieren para la construcción del túnel.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora se obtiene un volumen de hormigón consumido de 8,8 m<sup>3</sup>/m de túnel; Mientras que en el caso de la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto se obtiene un volumen de hormigón consumido de 46,0 m<sup>3</sup>/m de túnel.

### **5.6.1.3. Cantidad de acero consumido**

El indicador permite cuantificar la cantidad de acero utilizado para poder realizar la construcción del túnel. Este indicador tiene un peso del 20% del criterio consumos.

Para llevar a cabo la valoración de la cantidad de acero consumido se ha considerado los valores correspondientes a cada uno de los elementos de hormigón armado que se requieren para la construcción del túnel.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora se obtiene una cantidad de acero consumido de 1,5 t/m de túnel; mientras que en el caso de la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto se obtiene una cantidad de acero consumido de 5,6 t/m de túnel.

### **5.6.2. Criterio emisiones**

El criterio emisiones corresponde a un único indicador en que se estima la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por la construcción del túnel. El peso de este criterio es del 50% del requerimiento medioambiente.

#### **5.6.2.1. Cantidad de CO<sub>2</sub> emitido**

Con este indicador se tiene en consideración la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera en cada una de las alternativas consideradas. Este indicador tiene un peso del 100% del criterio emisiones.

Se ha realizado una estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera a partir de los datos medioambientales procedentes del banco de precios de infraestructuras.cat editados por el ITEC. Estos datos ambientales incluyen las emisiones de CO<sub>2</sub> en kg por elemento unitarios de las diferentes partidas de obra del presupuesto. La multiplicación de los datos de emisiones de CO<sub>2</sub> por las mediciones de cada una de las partidas y la suma de estas da lugar a un valor global de cantidad de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera para cada una de las alternativas. En última instancia se calcula las emisiones de CO<sub>2</sub> en toneladas por m de túnel dividiendo el peso de las emisiones de CO<sub>2</sub> total en toneladas por la longitud del túnel.

En el caso de la alternativa correspondiente a la ejecución del túnel mediante tuneladora se ha obtenido un valor total de las emisiones de 38.922 t de CO<sub>2</sub>. Este valor dividido por la longitud del túnel da lugar a 14,97 t de CO<sub>2</sub>/m de túnel.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante excavación a cielo abierto se aplica el procedimiento expuesto de considerar los valores de emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes del banco de precios de infraestructuras.cat considerando el conjunto de mediciones del presupuesto elaborado para esta alternativa. Una vez realizado el proceso de cálculo se obtiene un valor global de emisiones de CO<sub>2</sub> de 107.058 t CO<sub>2</sub>. Esta cantidad global

de emisiones considerando la longitud del túnel de 2.600 m se traduce en un valor de 41,18 t CO<sub>2</sub>/m de túnel.

## 5.7. CÁLCULO DEL VALOR DE LAS ALTERNATIVAS

La valoración de los diferentes indicadores para cada una de las dos alternativas consideradas se ha presentado en el apartado anterior. En el presente apartado se presentan los resultados del cálculo del valor de las dos alternativas. A continuación se presentan los resultados de la valoración de cada una de las dos soluciones constructivas frente a los diferentes requerimientos.

En el caso de las alternativas de ejecución del túnel mediante tuneladora y a cielo abierto se muestran en primer lugar todos los indicadores considerados y analizados en el presente caso de estudio. Se indican también los valores de las respuestas a cada indicador (X) indicadas en el capítulo anterior. Para llevar a cabo la valoración de las alternativas se procede en primer lugar a realizar el procedimiento indicado en apartado interior según el cual a partir de la evaluación a nivel de indicadores y el peso de cada indicador se evalúa a nivel de criterios el valor de las diferentes alternativas. Una vez obtenida la evaluación a nivel de criterios se procede considerando el peso relativo de cada uno de ellos a realizar la evaluación a nivel de requerimientos. Finalmente a partir de los pesos relativos de cada requerimiento se obtiene la evaluación final de la alternativa. Esta evaluación nos permite identificar la mejor alternativa en función del valor asociado a ella.

En la tabla 5.7 se muestra el proceso de evaluación para la primera alternativa (excavación con tuneladora) llevado a cabo para cada una de los indicadores según las consideraciones hechas en el capítulo anterior, que se multiplican por los pesos definidos para cada indicador. El sumatorio de los índices de valor calculados y multiplicados por el peso correspondiente se emplea para el cálculo de los índices de valor para cada criterio multiplicando por el peso correspondiente a ese criterio. Finalmente se realiza el proceso de obtención de los índices de cada requerimiento multiplicando por el correspondiente peso para obtener en última instancia el índice de valor de la alternativa analizada.

A partir de los resultados obtenidos puede observarse que en el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora se obtiene un índice de 0,280 para el requerimiento económico, de 0,190 en el social y de 0,280 en el de medioambiente. El índice de valor de la alternativa es de 0,752.

A partir de los resultados obtenidos puede observarse asimismo que en el caso de esta alternativa los requerimientos económico, social y medioambiente tienen una valoración equilibrada siendo el requerimiento social el que presenta una valoración inferior. Observando también los resultados obtenidos a nivel de criterios en esta alternativa se puede constatar una distribución de las valoraciones que van de 0,260 a 0,600. Las valoraciones de los indicadores se sitúan en un rango de valores entre 0,090 y 1,000 para esta alternativa.

Indicador	X	Valor	P	Iv In.	Σ	Criterio	P	Iv crit.	Σ	Requerimiento	P	Iv Requ.	Iv final
Coste inicial construcción	22305	0,27	0,65	0,176		Costes	0,60	0,26	0,62	Económico	0,45	0,28	
Desviación del coste	12,2	0,80	0,22	0,174	0,44								
Coste de mantenimiento	55,17	0,69	0,13	0,090									
Tiempo de construcción	11	0,87	0,75	0,653	0,90	Tiempo	0,40	0,36					
Desviación temporal	85	0,99	0,25	0,248									
Molestias para el productor	30	0,82	0,50	0,410	0,65	Efectos productor	0,40	0,26	0,86	Social	0,22	0,19	0,752
Seguridad del operario	71	0,48	0,50	0,240									
Molestias al entorno	10	1,00	1,00	1,000	1,00	Efectos terceros	0,60	0,60					
Cantidad de energía consumida	31293	0,79	0,60	0,474	0,86	Consumos	0,50	0,43	0,86	Medioambiente	0,33	0,28	
Cantidad de hormigón consumido	8,80	0,96	0,20	0,192									
Cantidad de acero consumido	1,50	0,97	0,20	0,194									
Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido	14,97	0,85	1,00	0,850	0,85	Emissiones	0,50	0,43					

**Tabla 5.7: Resultados del índice de valor para la alternativa de excavación del túnel con tuneladora**

Se han llevado el cálculo del índice de valor para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de la alternativa anterior. En la Tabla 5.8 se presentan los resultados del análisis realizado para esta alternativa.

Para el requerimiento económico se obtiene un índice de 0,130. En el caso del requerimiento social se obtiene un índice de 0,070 así como un índice de 0,070 para el requerimiento medioambiente. Finalmente el índice de valor de la alternativa es de 0,275.

En el caso de esta alternativa puede observarse una valoración no uniforme siendo el requerimiento económico el más valorado de la alternativa mientras que los otros dos requerimientos presentan una valoración marcadamente inferior.

Indicador	X	Valor	P	Iv Indic.	Σ	Criterio	P	Iv Crit.	Σ	Requerimiento	P	Iv Requ.	Iv final
Coste inicial construcción	22803	0,23	0,65	0,150									
Desviación del coste	20	0,66	0,22	0,143	0,37	Costes	0,60	0,22					
Coste de mantenimiento	57,01	0,60	0,13	0,078					0,30	Económico	0,45	0,13	
Tiempo de construcción	25	0,00	0,75	0,000									
Desviación temporall	55	0,73	0,25	0,183	0,18	Tiempo	0,40	0,07					
Molestias para el productor	55	0,49	0,50	0,245									
Seguridad del operario	55	0,59	0,50	0,295	0,54	Efectos productor	0,40	0,22					
									0,32	Social	0,22	0,07	
Molestias al entorno	2,85	0,17	1,00	0,170	0,17	Efectos terceros	0,60	0,10					0,275
Cantidad de energía consumida	95.041	0,00	0,60	0,000									
Cantidad de hormigón consumido	46,00	0,16	0,20	0,032	0,16	Consumos	0,50	0,08					
Cantidad de acero consumido	5,60	0,66	0,20	0,132					0,22	Medioambiente	0,33	0,07	
Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido	41,18	0,27	1,00	0,270	0,27	Emisiones	0,50	0,14					

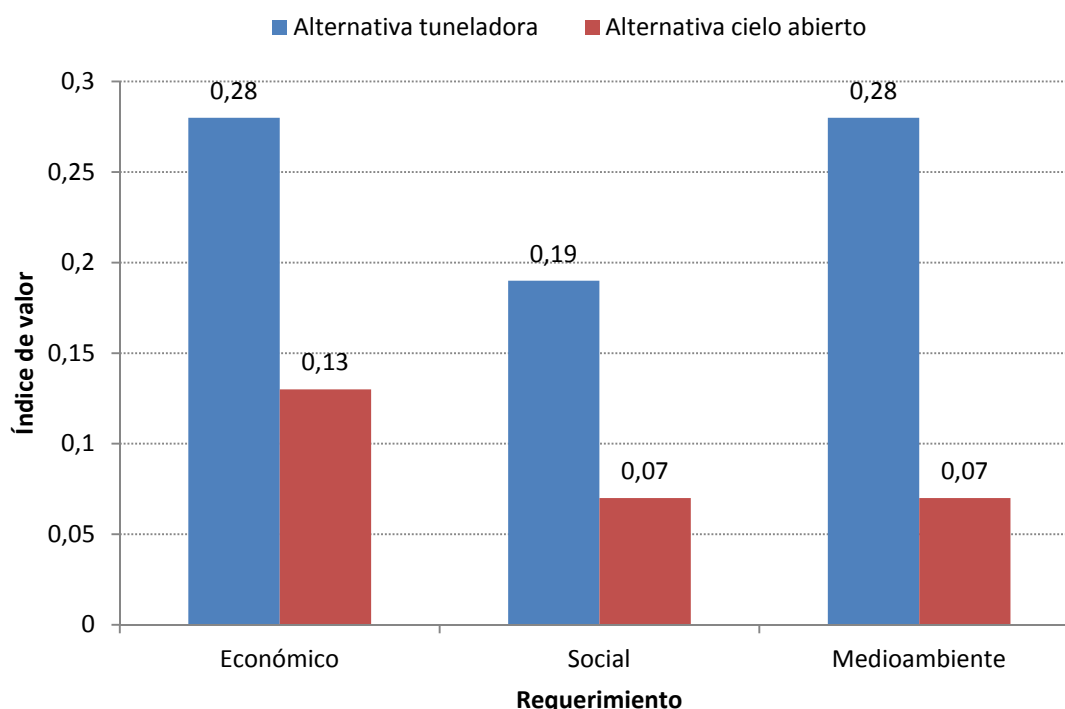
**Tabla 5.8: Resultados del índice de valor para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto**

Los resultados obtenidos para la alternativa de excavación a cielo abierto a nivel de criterios se sitúan en un rango que va de 0,070 a 0,022. Las valoraciones de los indicadores se sitúan en un rango de valores entre 0,000 y 0,295 para esta alternativa.

Comparando los resultados obtenidos puede observarse que la casi totalidad de los indicadores presentan una valoración mayor para el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora frente a la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto. Asimismo la totalidad de los criterios y requerimientos presentan una valoración mayor en el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora.

En la Figura 5.4 se presenta para cada una de las alternativas consideradas y de forma desglosada el valor de los requerimientos planteados y evaluados. Se puede observar de forma clara la preponderancia de los índices de valor para el conjunto de los tres requerimientos para la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora. En la figura se pone también en

evidencia el peso relativo de cada uno de los requerimientos a nivel de índice de valor para la valoración final de cada una de las alternativas.



**Figura 5.4:** Índices de valor para cada uno de los requerimientos y las alternativas consideradas

En definitiva, la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora presenta un mayor índice de valor al ser este de 0,752 frente al índice de valor de la alternativa correspondiente a la ejecución del túnel a cielo abierto que presenta un valor de 0,275. Hay que indicar que estos valores han sido obtenidos bajo ciertas condiciones de contorno por lo que pueden dar lugar a algunas variaciones en base a distintos factores como la diferente asignación de los pesos. Este aspecto puede ser considerado mediante un análisis de sensibilidad.

Los análisis de sensibilidad se suelen llevar a cabo variando el peso de los requerimientos y manteniendo las proporciones de los pesos del resto, de tal manera que todos ellos sigan sumando la unidad. No suelen llevarse a cabo cambios en los pesos de criterios o indicadores ya que su influencia en el resultado final no acostumbra a ser tan alta como un cambio en el peso de los requerimientos. Se aconseja variar los pesos de cada uno de los requerimientos en un rango de 0,3 centrado en el valor inicial, es decir, si el peso de un requerimiento 1 tiene un peso de 0,35, el rango de variación del peso estaría comprendido entre 0,2 y 0,5. Aplicando este criterio a los tres requerimientos del árbol de decisiones obtenemos las siguientes valoraciones de las dos alternativas tal y como se recogen en la tabla 5.9.



Requerimiento			Valoración alternativa	
Económico	Social	Medioambiente	Iv alternativa tunleadora	Iv alternativa cielo abierto
0,30	0,28	0,42	0,787	0,269
0,60	0,16	0,24	0,717	0,281
0,36	0,37	0,27	0,774	0,283
0,53	0,07	0,40	0,733	0,266
0,35	0,17	0,48	0,775	0,262
0,58	0,29	0,13	0,722	0,292

**Tabla 5.9:** Pesos asignados en el análisis de sensibilidad a los diferentes requerimientos y valoración de las alternativas en cada uno de los análisis

El análisis de sensibilidad realizado a nivel de requerimientos indica que las valoraciones de las alternativas dan lugar a variaciones poco importantes y que se sitúan en un rango máximo del 3 al 6% respecto los valores con los pesos iniciales considerados. Podemos concluir por tanto que la valoración de las alternativas con nuestro modelo de análisis es poco sensible a los cambios en los pesos a nivel de requerimientos.

Hay que señalar al respecto que los supuestos y resultados obtenidos de este capítulo se encuentran sujetos a interpretación y discusión al encontrarse basados en parte en las consideraciones realizadas por el autor de la misma. No hemos de olvidar que el objetivo principal de la tesina corresponde a la aplicación de una metodología para la obtención de un resultado basado en un análisis de valor para el caso considerado de elección entre dos alternativas de ejecución de un túnel en una zona urbana.

## 6. CONCLUSIONES

### 6.1. INTRODUCCIÓN

La presente tesina se ha llevado a cabo con el objetivo de desarrollar una metodología y herramienta a la vez de ayuda en el proceso de decisión en la ejecución de un túnel con tuneladora o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio. La herramienta desarrollada aporta un criterio basado en una metodología que intenta dar soporte a la decisión tomada.

En este capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo llevado a cabo a la vez que en él se indican las futuras líneas de estudio que se podrían adoptar a partir del trabajo realizado.

El capítulo se estructura en una primera presentación de las conclusiones generales seguida de una exposición de las conclusiones específicas obtenidas en cada uno de los capítulos para finalmente exponer de las futuras líneas de estudio.

### 6.2. CONCLUSIONES GENERALES

Una vez llevados a cabo los trabajos relacionados con la presente tesina podemos concluir que los objetivos fijados al principio de la misma han sido alcanzados.

En el apartado de estado del conocimiento se ha llevado a cabo una revisión de las tecnologías empleadas para la excavación de túneles en entornos urbanos que se han considerado en la presente toma de decisión. En dicho capítulo se ha realizado asimismo una descripción del tramo donde se llevará a cabo la aplicación del análisis de las alternativas así como una serie de consideraciones relacionadas con la aplicación de cada una de las alternativas consideradas para el tramo en cuestión.

Con posterioridad se ha desarrollado una metodología encaminada a la selección del método de ejecución de un túnel mediante tuneladora o a cielo abierto basándose en el empleo de técnicas de análisis multicriterio. La metodología empleada ha correspondido a la construcción de un modelo jerárquico de tres niveles que son: requerimientos, criterios e indicadores. A partir de este proceso se ha podido estructurar de forma clara y ordenada el proceso que nos ha de permitir el análisis de las distintas alternativas de ejecución de un túnel. Finalmente mediante un análisis de valor, en que cada indicador tiene una función de valor asociada, se ha llegado a la obtención de un índice para las diferentes alternativas que se quieren analizar.

Finalmente se ha realizado una selección de parámetros con el objetivo de distinguir entre las distintas alternativas de ejecución del túnel. Las distintas alternativas han sido evaluadas según la herramienta que ha sido desarrollada para alcanzar las conclusiones que se detallan a continuación.

## **6.3. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS**

### **6.3.1. Conclusiones sobre el tramo de análisis**

En el capítulo 2 se ha llevado a cabo una descripción del tramo de análisis, llegándose a las siguientes conclusiones:

- El análisis de alternativas para la ejecución de un túnel mediante tuneladora o mediante excavación a cielo abierto se llevará a cabo en el tramo 2 de la línea 9 de Barcelona situada en la Zona Franca de esta ciudad.
- La información geotécnica recopilada procede de los sondeos y parámetros geotécnicos establecidos para la realización del proyecto constructivo de la L9 en la zona.
- Los materiales que encontramos y que afectan a la infraestructura prevista corresponden a un nivel de rellenos antrópicos (denominada Ra en L9) al nivel superficial (denominada  $Q_{11}$ ) y al nivel detrítico superior de arenas medias y gruesas (denominada  $Q_{12}$ ).

### 6.3.2. Conclusiones sobre el análisis multicriterio

En el capítulo 3 se ha llevado a un repaso a los conceptos relacionados con las metodologías y herramientas existentes en torno a la toma de decisión mediante un análisis multicriterio. En el caso de estudio de la presente tesina se llevará a cabo mediante la herramienta MIVES y con una metodología con las siguientes características:

- Metodología englobada dentro de la corriente metodológica de la teoría de utilidad multiatributo.
- Los aspectos a considerar se estructuraran en forma de árbol de decisiones.
- La función de valor genérica corresponde a la utilizada en MIVES.
- El tipo de agregación que se realizará corresponde a una suma ponderada.
- La metodología de asignación de pesos será la directa, de comparación mediante una sola referencia o AHP.

### 6.3.3. Conclusiones acerca del análisis del método

A partir de los trabajos realizados en el capítulo de análisis del método se concluye que la estructura de dicha metodología es consistente y lógica.

- La decisión del estudio se focaliza en las técnicas de ejecución de un túnel y en concreto entre dos tipologías de túnel correspondientes a la ejecución del túnel mediante tuneladora y a cielo abierto.
- La metodología desarrollada se basa en un modelo jerárquico con tres clases de requerimientos: económico, social y medioambiente. A partir de estas tres clases se construye un árbol de valores del modelo.
- Cada uno de estas clases se han desglosado en criterios y indicadores que finalmente han caracterizado las variables que influyen en la toma de decisión de la ejecución del túnel y se ha obtenido el árbol de valores definitivo.
- El árbol de requerimientos consta de un total de seis criterios (dos por requerimiento) y de doce indicadores que se reparten en cinco del requerimiento económico, tres del requerimiento social y cuatro del requerimiento medioambiente.
- El proceso de evaluación ha consistido en una serie de distintas etapas que incluyen la ponderación de pesos, la construcción de la función de valor, el cálculo del valor de las alternativas y el cálculo de la alternativa óptima.

- La ponderación de los diferentes requerimientos, criterios e indicadores se ha llevado a cabo mediante asignación directa a nivel de requerimientos y criterios así como mediante la metodología AHP en el caso de los indicadores.
- Se ha llevado a cabo una normalización de las variables analizadas por los indicadores mediante la función de valor estimada mediante la herramienta MIVES.
- Esta metodología que se ha desarrollado mediante la estructura del árbol de requerimientos, ponderación de los diferentes niveles del árbol y la construcción de las funciones de valor para transformar las unidades conducen a un análisis riguroso y sistemático de las alternativas de ejecución.

#### **6.3.4. Conclusiones sobre los indicadores y funciones de valor**

A partir de las consideraciones realizadas respecto a los indicadores y las funciones de valor establecidas podemos concluir:

- Se han analizado y establecido las variables que influyen en la toma de decisión para la ejecución de un túnel entre dos tipologías consideradas (tuneladora y excavación a cielo abierto).
- Se han definido los indicadores y las correspondientes funciones de valor para la cuantificación de las diferentes alternativas de ejecución de un túnel.

#### **6.3.5. Conclusiones sobre la evaluación de alternativas y resultados**

Se ha llevado a cabo una evaluación de las alternativas consideradas para un caso concreto de túnel en zona urbana en un tramo 2 de la línea 9 en la ciudad de Barcelona en el sector de la zona Franca.

A partir de las consideraciones llevadas a cabo en este capítulo y después de realizar el análisis de las alternativas, se concluye lo siguiente:

- La alternativa con un índice de valor mayor ha resultado ser la opción de ejecución del túnel mediante tuneladora.
- La alternativa con un índice de valor menor resulta ser la ejecutada mediante excavación a cielo abierto.
- El análisis de sensibilidad realizado a nivel de los pesos de los requerimientos no arroja diferencias apreciables en la valoración final de las alternativas.
- De los resultados obtenidos cabe destacar que estos no son absolutos, es decir que podemos obtener que una alternativa es mejor que la otra pero debemos de tener

presente que los resultados presentan un carácter relativo debido a que se ha incluido la valoración de algunos parámetros de forma cualitativa.

#### 6.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En la presente tesina se ha llevado a cabo el desarrollo de una metodología y de una herramienta con el fin de realizar el proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con excavación mediante tuneladora o a cielo abierto a través del empleo de técnicas de análisis multicriterio. A partir de los resultados obtenidos y de las incertidumbres presentes en la línea de desarrollo se consideran como posibles futuras líneas de investigación a seguir las siguientes:

- Mejora de la aproximación desarrollada con el fin de llegar a resultados más precisos. En este sentido se pone como ejemplo el desarrollo del indicador de desviación probable del coste en que se ha llevado a cabo únicamente una estimación del mismo.
- Desarrollar el método de análisis con la ampliación de los límites incluyendo los anteriores a la vida útil (estudios previos) y posteriores a estos (demolición).
- Análisis de sensibilidad con variaciones de pesos a nivel de criterios y funciones de valor.
- Ampliación del análisis de valor a otras tipologías de excavación de túneles como puede ser el método con excavación convencional (NATM).

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Alarcón, D.B. *Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles*. Tesis doctoral. (2005). Departament d'enginyeria de la construcció – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España. Directores: Antonio Aguado de Cea y Alejandro Josa García-Tornel.

Autoritat del Transport Metropolità. *Pla Director d'infraestructures de la regió metropolitana de Barcelona 2001-2010: Memòria actualitzada*. ATM. Barcelona. (2013).

Blom, C.B.M. *Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils*. Tesis doctoral. Universidad Tecnológica de Delft. (2002).

Durán Bertrán, P. *Método de discriminación entre distintas soluciones de pilares mediante criterios de sostenibilidad*. Tesina. (2011). Departament d'Enginyeria de la Construcció – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España. Tutor: Antonio Aguado de Cea.

EHE. *Instrucción de Hormigón Estructural*. Secretaría general técnica. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. (2008).

*Guía de iniciación TCQ2000 ITEC*. Instituto Tecnológico de la Construcción de Catalunya ITEC. (2016).

López Gimeno, C. *Manual de túneles y obras urbanas*. Ed. Carlos Lopez Jimeno. Madrid. España. (2011).

Pardo i Bosch, F.. *Gestión integral de obras hidráulicas de hormigón: del diagnóstico a la inversión*. Tesis doctoral (2014). Departament d'Enginyeria de la Construcció – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España. Director: Antonio Aguado de Cea.

Bestratén Belloví, M. *Manual de procedimiento de prevención de riesgos laborales*. INSHT. (2003). ISBN: 84-7425-636-4.

Puertas Herranz, J. *Estimación de coste y plazo en proyectos de túneles ejecutados mediante excavación convencional y voladura*. Tesina (2010). Departament del Transport i del territori – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. Tutor: Alvar Garola Crespo.

Saaty, T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Settings, Resource Allocation*. Ed. McGraw-Hill. (1980). ISBN 0-07-054371-2.

Sáenz de Santamaría Gatón, I. *Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles mecanizados*. Tesina. (2007). Departament Enginyeria Civil i Ambiental - Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. Tutores: Alvar Garola Crespo, Carles López Carreras.

Villegas Flores, N. *Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras*. Tesis doctoral (2009). Departament d'Enginyeria de la Construcció – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España. Director: Antonio Aguado de Cea.

Vinyolas Prat, B. *Aplicaciones y avances de la metodología MIVES en valoración multicriterio*. Tesis doctoral. (2011). Departament d'enginyeria de la Construcció – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España. Directores: Antonio Aguado de Cea y Alejandro Josa García-Tornel.

#### REFERENCIAS OBTENIDAS DE INTERNET

<https://www.herrenknecht.com>

<https://www.bioceanicoaconcagua.com>

[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Guias\\_Ev\\_Riesgos/Manual\\_Proced\\_Prev\\_Riesgos/ejemplo4.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Guias_Ev_Riesgos/Manual_Proced_Prev_Riesgos/ejemplo4.pdf)

<http://itec.es/nouentitats.e/entitats.aspx>

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/905w.pdf>



<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/906w.pdf>

<http://www.railsystem.net/cut-and-cover/>

## ANEJO A: ESTIMACIÓN DEL PLAZO Y COSTE DE LA ALTERNATIVA CON TUNELADORA

### INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente anejo corresponde a la presentación de los resultados obtenidos mediante la aplicación desarrollada por Ignacio Sáenz de Santamaría Gatón en su tesina *“ESTIMACION DE COSTE Y PLAZO DE EJECUCION EN PROYECTOS DE TUNELES MECANIZADOS”* realizada en 2007.

La aplicación desarrollada se trata de una hoja de excel realizada por el autor que permite mediante un proceso sencillo y una rápida aplicación obtener a través de la introducción de una serie de parámetros básicos considerados determinantes en su influencia tanto el coste como el plazo de ejecución. A través del estudio previo de una base de datos de ejecuciones de túneles mediante tuneladora la aplicación ofrece una serie de resultados, tanto gráficos como numéricos, basados en distribuciones normales que definen tanto el plazo como el coste esperado en la construcción de un túnel mecanizado.

Los datos de inicio que considera la aplicación son el diámetro de excavación de la tuneladora, la longitud total del tramo excavado, la cobertura, el tipo de material excavado (suelo o roca), la presencia o ausencia de agua, el tipo de tuneladora empleada y si se trata de un escudo simple o doble. La hoja permite considerar hasta 4 tramos o zonas diferenciadas en el análisis. Además de los datos indicados la hoja permite introducir 4 datos adicionales que ayudan a acotar el resultado final. Estos datos adicionales corresponden a la pérdida de maquinaria (durante el transcurso de la obra), un factor de rendimiento que permite considerar la sinuosidad del trazado, la distancia a origen de la tuneladora (coste de transporte de la maquina) y la disponibilidad de fábrica de dovelas en la obra.

## INTRODUCCIÓN DE DATOS

En nuestro caso los valores considerados para un único tramo correspondiente al túnel en trazado recto en la Zona Franca de Barcelona ha sido considerar el trazado como urbano con una tuneladora de 9,4 m de diámetro y una longitud total de 2.600 m con una cobertura media de 15 m, material tipo suelo con presencia de agua ejecutado mediante tuneladora tipo EPB y escudo simple. Adicionalmente se ha considerado que no se produce pérdida de la máquina, un factor de rendimiento del 100% (tramo rectilíneo), una distancia al origen de la tuneladora de 1.200 km y sin disponibilidad de fábrica de dovelas. En la figura A.1 se muestran los datos introducidos en la aplicación.

DATOS ZONIFICACION				
	ZONA 1		ZONA 2	
PROB. PRODUCCION	1	0		
ZONA	URBANO	URBANO		
DIAMETRO	9.4	9.4		
LONGITUD TOTAL	2600	2600		
COBERTURA	15	15		
MATERIAL	SUELO	MIXTO		
AGUA	SI	SI		
TUNELADORA	EPB	EPB		
ESCUDO	SIMPLE	SIMPLE		
	ZONA 3		ZONA 4	
PROB. PRODUCCION				
ZONA				
DIAMETRO				
LONGITUD				
COBERTURA				
MATERIAL				
AGUA				
TUNELADORA				
ESCUDO				
PERDIDA MAQUINA	NO		LONGITUD TOTAL	
FACTOR RENDIMIENTO	100%		2600	
DIST. ORIGEN TUNELADORA	1200		GAP	
DISPONIBILIDAD FABRICA	NO		0.15	
DOVELAS			DIAMETRO INTERNO UTIL	
			8.46	
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4
COBERTURA SUFICIENTE	COBERTURA INSUFICIENTE			

Figura A.1: Datos introducidos en la herramienta de cálculo del plazo y coste de la ejecución del tramo desarrollada por Ignacio Sáenz de Santamaria Gató (2007).

A partir de los datos la hoja realiza una estimación del gap y del diámetro interno útil de la sección excavada. La hoja realiza asimismo una verificación de cobertura considerando un valor teórico mínimo de dos diámetros. Esta verificación no tiene influencia en los resultados posteriores de la hoja.

## RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de los datos facilitados la hoja nos da una serie de resultados correspondientes al plazo de ejecución del tramo con tuneladora y del coste del mismo. Los resultados como se ha indicado se presentan en forma de distribución normal centrados en el valor esperado

tanto de plazo como de coste de la obra. El coste se da como presupuesto de ejecución material (P.E.M.).

En la figura A.2 se presenta el resumen de resultados obtenidos (plazo y coste en P.E.M.) mediante la aplicación utilizada.

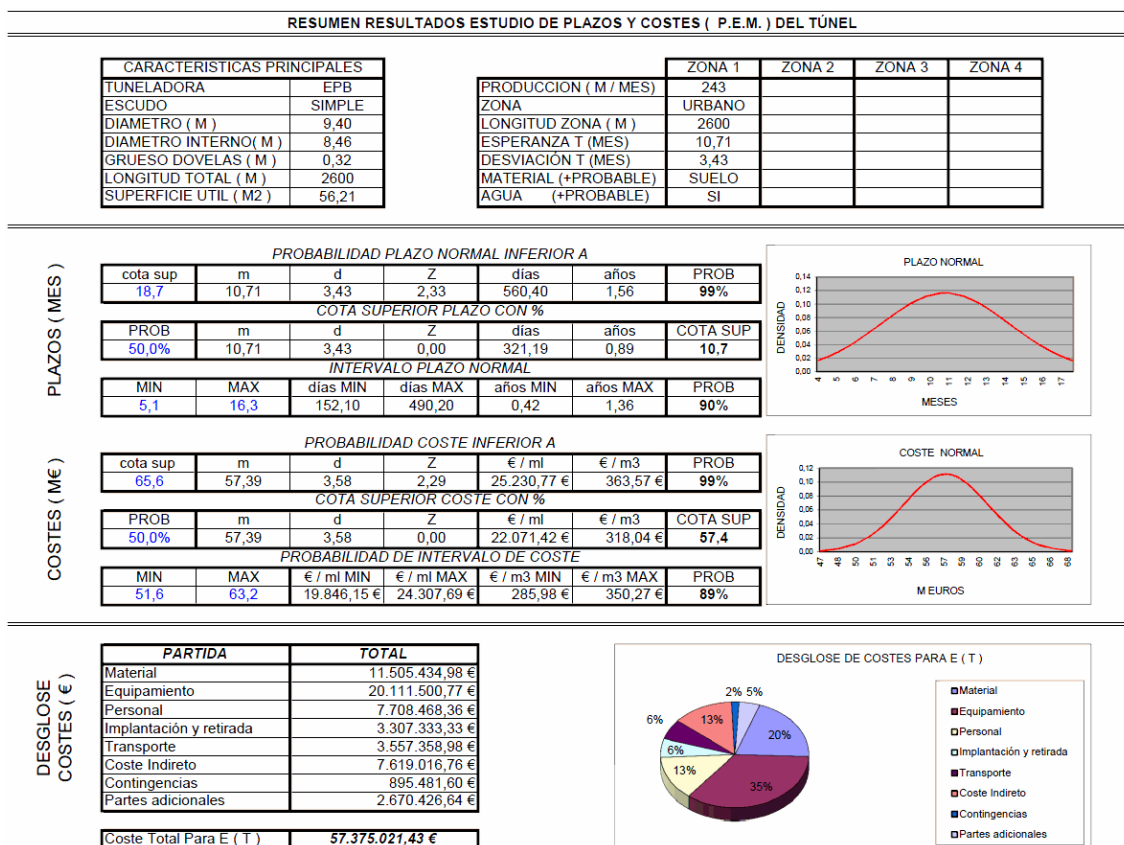


Figura A.2: Resumen de resultados obtenidos mediante la herramienta de cálculo del plazo y coste de la ejecución del tramo desarrollada por Ignacio Sáenz de Santamaria Gató (2007).

A partir del análisis realizado podemos observar que se obtiene un plazo normal de ejecución centrado en 10,71 meses así como un coste normal de 57.375.021,43 €. Se puede observar también el desglose del coste normal según la ITA para túnel de metro en suelo.

## **ANEJO B: CÁLCULO DE PANTALLAS ALTERNATIVA EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO**

### **INTRODUCCIÓN**

En este anejo se lleva a cabo un cálculo de la solución correspondiente a la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto. Se trata de dimensionar la solución de contención del terreno mediante muros pantallas anclados con anclajes en el terreno. Tras una serie de tanteos se ha optado por una solución mediante tres niveles de anclajes.

Los cálculos se han llevado a cabo mediante la aplicación Cype 2011 que contiene el módulo de elementos de contención mediante muros pantalla.

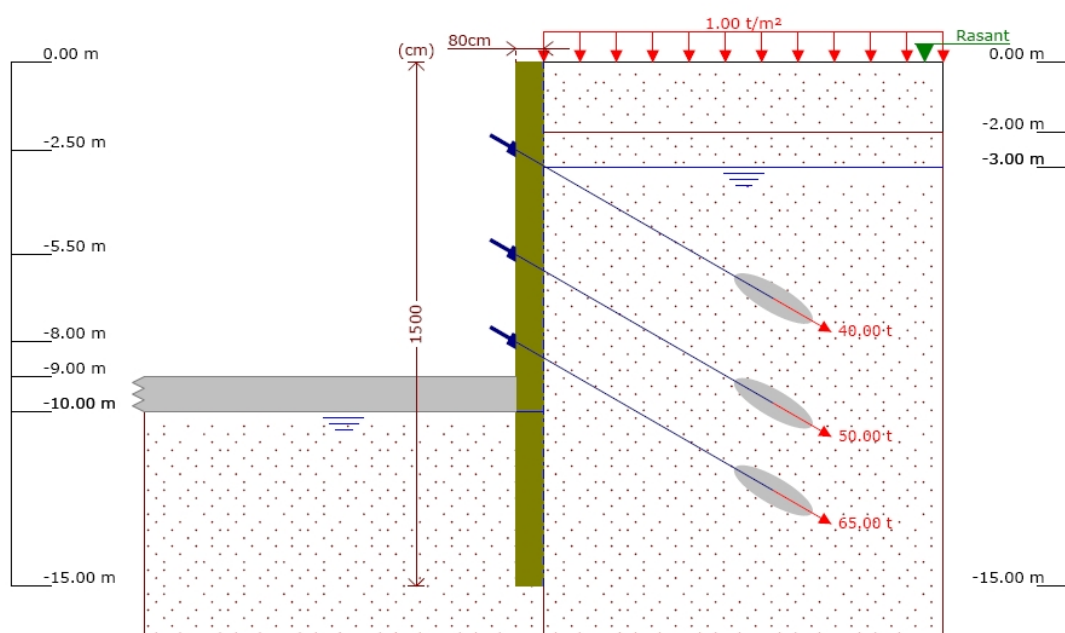
El programa permite el cálculo, comprobación y dimensionamiento de muros pantalla mediante diversas tipologías (muro de hormigón armado, muro de pilotes, micropilotes, tablestacas,...). El programa permite además la introducción de diferentes elementos de soporte (anclajes activos y pasivos, puntales, forjados, etc..). El análisis que realiza el programa es no lineal, considerando para el terreno y los elementos de soporte una ley de comportamiento elastoplástica. El programa permite asimismo realizar una comprobación de estabilidad global (círculos de deslizamiento).

## DATOS DE PARTIDA

Se ha considerado una solución a base de pantallas de hormigón armado con tres niveles de anclajes en el terreno.

Se ha partido de los datos geotécnicos de la zona recopilados procedentes de los proyectos constructivos del tramo de L9 ejecutado. Como se ha indicado en el capítulo 2 de esta tesina el subsuelo se encuentra formado por materiales de edad cuaternaria reciente asociados a la zona del delta del Llobregat. Se trata de materiales con poca o nula consolidación con predominio de materiales de tipo granular con escasa cohesión y que se encuentran saturados por debajo del nivel freático situado a muy poca profundidad en el terreno. Los parámetros considerados en los cálculos corresponden a los recogidos en la tabla 2.1 de la presente tesina (capítulo 2 Estado del conocimiento).

El procedimiento constructivo considerado consiste en una primera ejecución de las pantallas y sucesivos niveles de excavación y realización de anclajes para la contención del terreno. En la figura B.1 se presenta la sección tipo de pantallas considerada en los cálculos.



*Figura B.1: Esquema de la sección tipo pantallas con tres niveles de anclajes consideradas en los cálculos realizados mediante el programa Cype 2011 módulo pantallas.*

Los valores de las rigideces de los elementos estructurales y de apuntalamiento se recogen en los listados del siguiente apartado. En el siguiente apartado se recogen también los resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados.

## RESULTADOS DEL CÁLCULO

Se presentan los resultados obtenidos a partir del cálculo realizado. Estos resultados han servido de base para la realización posterior del presupuesto del coste de ejecución de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto.

### 1.- NORMA I MATERIALS

Norma de formigó: EHE-98-CTE (Espanya)

Formigó: HA-30, Control Estadístico

Acer: B 500 S, Control Normal

Classe d'exposició: Clase IIa

Recobrimient geomètric: 7.0 cm

Grandària màxima del granulat: 20 mm

### 2.- ACCIONS

Majoració esforços en construcció: 1.30

Majoració esforços en servei: 1.50

Sense anàlisis sísmic

Sense considerar accions tèrmiques en puntals

### 3.- DADES GENERALS

Cota de la rasant: 0.00 m

Alçària del mur sobre la rasant: 0.00 m

Tipologia: Mur pantalla de formigó armat

#### 4.- DESCRIPCIÓ DEL TERRENY

Porcentatge de la fricció interna entre el terreny i l'extradós del mur pantalla: 66.0 %

Porcentatge de la fricció interna entre el terreny i l'intradós del mur pantalla: 66.0 %

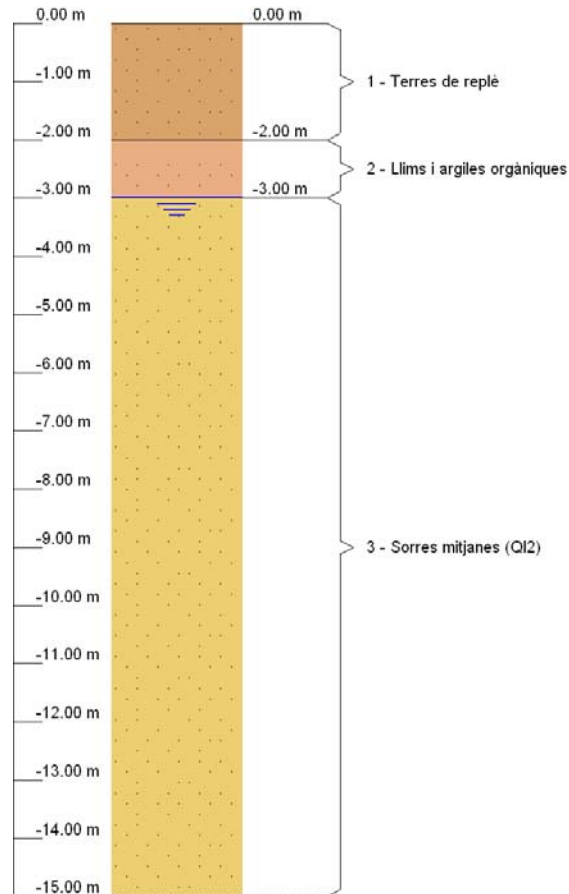
Profunditat del nivell freàtic: 3.00 m

#### ESTRATS

Referències	Cota superior	Descripció	Coefficients d'empenta
1 - Terres de replè	0.00 m	Densitat aparent: 1.9 kg/dm <sup>3</sup> Densitat submergida: 1.0 kg/dm <sup>3</sup> Angle fricció intern: 27 graus Cohesió: 0.00 t/m <sup>2</sup> Mòdul de balast empenta activa: 1000.0 t/m <sup>3</sup> Mòdul de balast empenta passiva: 1000.0 t/m <sup>3</sup> Gradient mòdul de balast: 0.0 t/m <sup>4</sup>	Actiu extradós: 0.32 Repòs extradós: 0.55 Passiu extradós: 4.50 Actiu intradós: 0.32 Repòs intradós: 0.55 Passiu intradós: 4.50
2 - Llims i argiles orgàniques	-2.00 m	Densitat aparent: 2.0 kg/dm <sup>3</sup> Densitat submergida: 1.0 kg/dm <sup>3</sup> Angle fricció intern: 29 graus Cohesió: 2.50 t/m <sup>2</sup> Mòdul de balast empenta activa: 3000.0 t/m <sup>3</sup> Mòdul de balast empenta passiva: 3000.0 t/m <sup>3</sup> Gradient mòdul de balast: 0.0 t/m <sup>4</sup>	Actiu extradós: 0.29 Repòs extradós: 0.52 Passiu extradós: 5.25 Actiu intradós: 0.29 Repòs intradós: 0.52 Passiu intradós: 5.25
3 - Sorres mitjanes (QI2)	-3.00 m	Densitat aparent: 2.0 kg/dm <sup>3</sup> Densitat submergida: 1.0 kg/dm <sup>3</sup> Angle fricció intern: 30 graus Cohesió: 1.00 t/m <sup>2</sup> Mòdul de balast empenta activa: 1000.0 t/m <sup>3</sup> Mòdul de balast empenta passiva: 1000.0 t/m <sup>3</sup> Gradient mòdul de balast: 0.0 t/m <sup>4</sup>	Actiu extradós: 0.28 Repòs extradós: 0.50 Passiu extradós: 5.69 Actiu intradós: 0.28 Repòs intradós: 0.50 Passiu intradós: 5.69



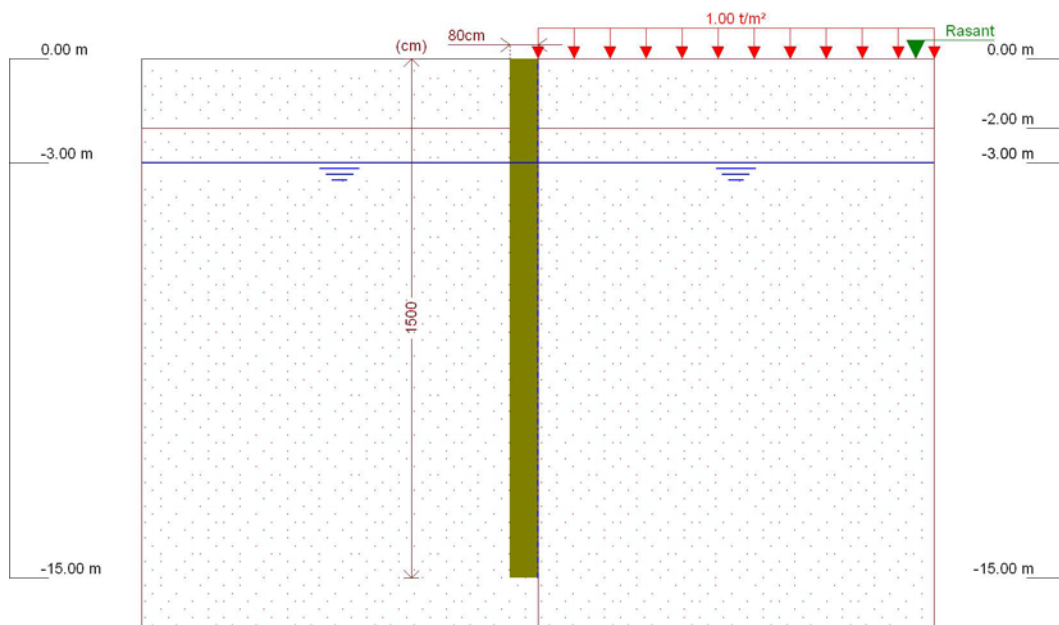
## 5.- SECCIÓ VERTICAL DEL TERRENY



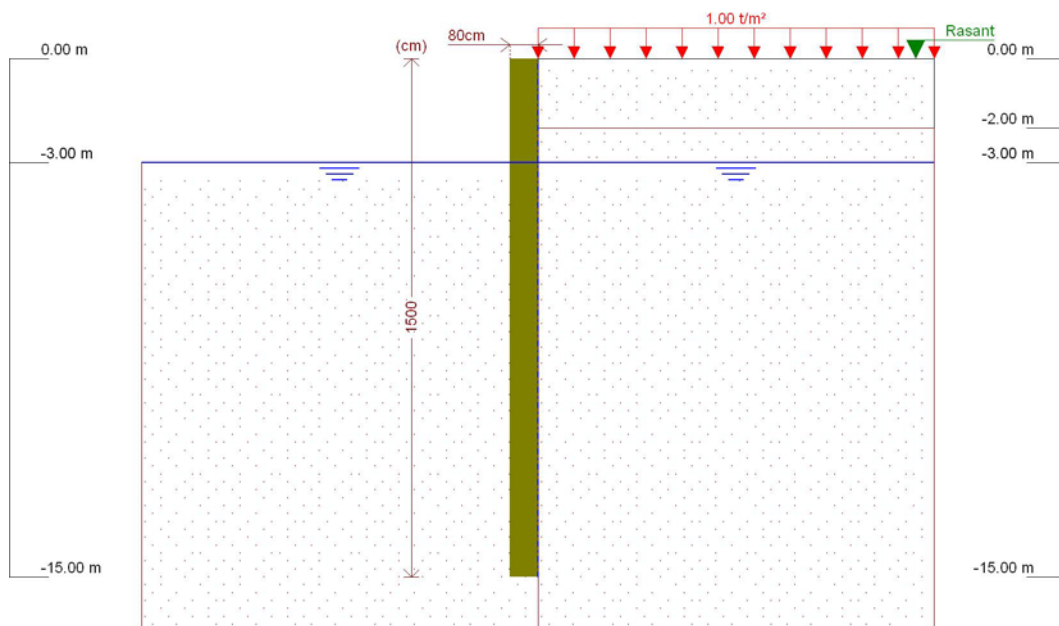
## 6.- GEOMETRIA

Alçària total: 15.00 m  
Gruix: 80 cm  
Longitud tram: 2.50 m

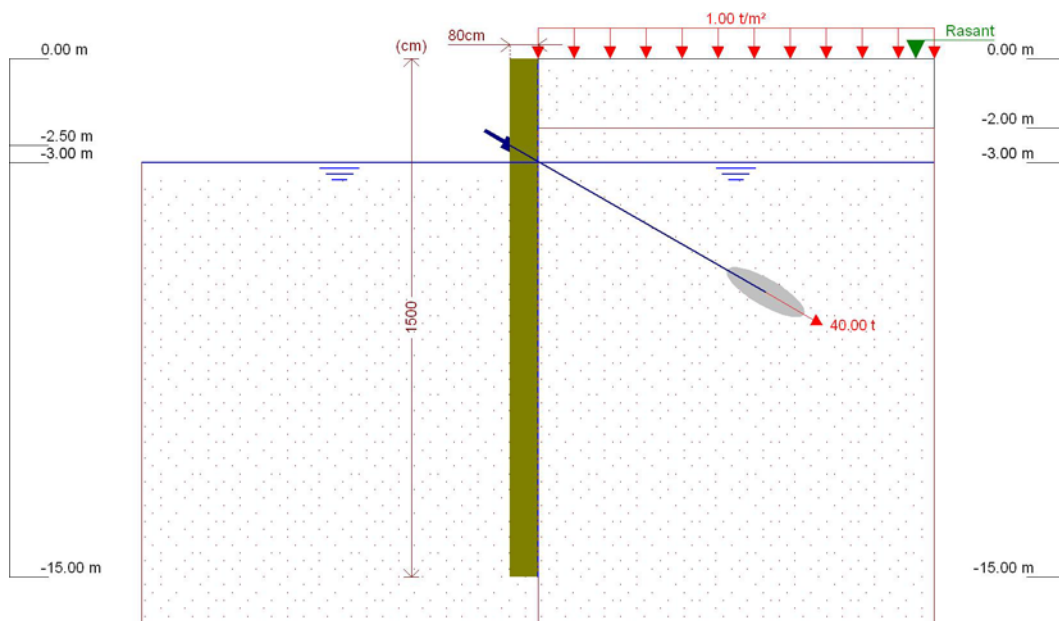
## 7.- ESQUEMA DE LES FASES



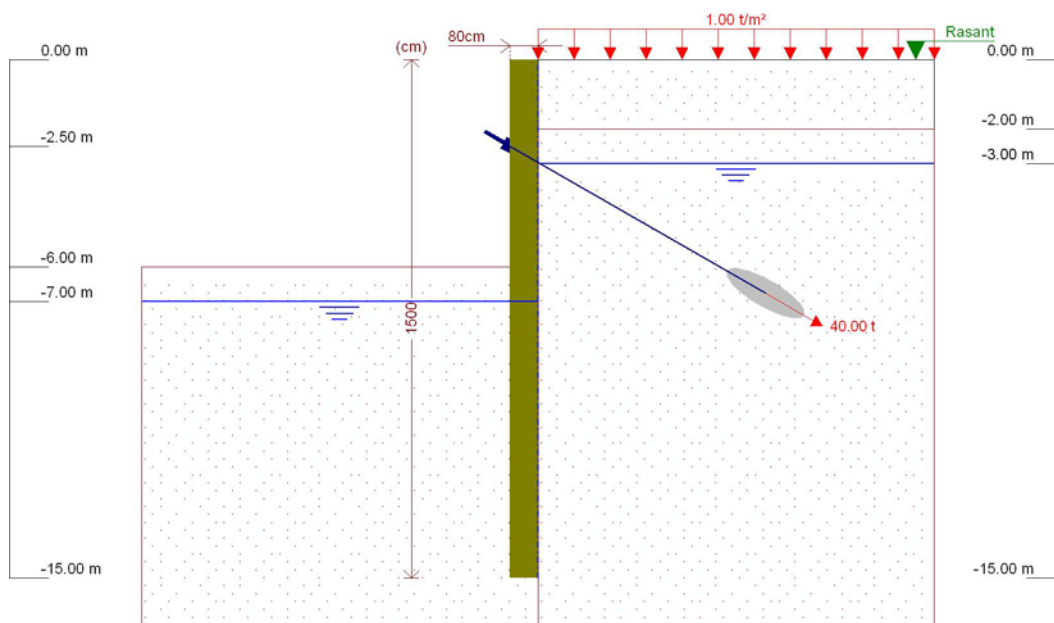
Referències	Nom	Descripció
Fase 1	Fase inicial	Tipus de fase: Constructiva Cota d'excavació: 0.00 m Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -3.00 m



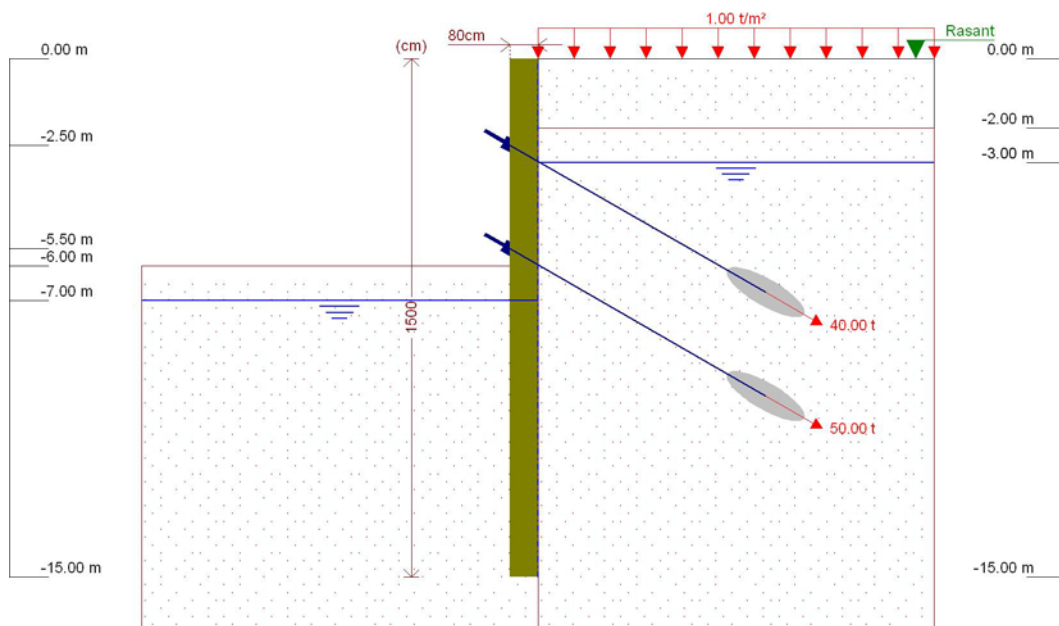
Referències	Nom	Descripció
Fase 2	Fase excavación 1	<p>Tipus de fase: Constructiva</p> <p>Cota d'excavació: -3.00 m</p> <p>Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m</p> <p>Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -3.00 m</p>



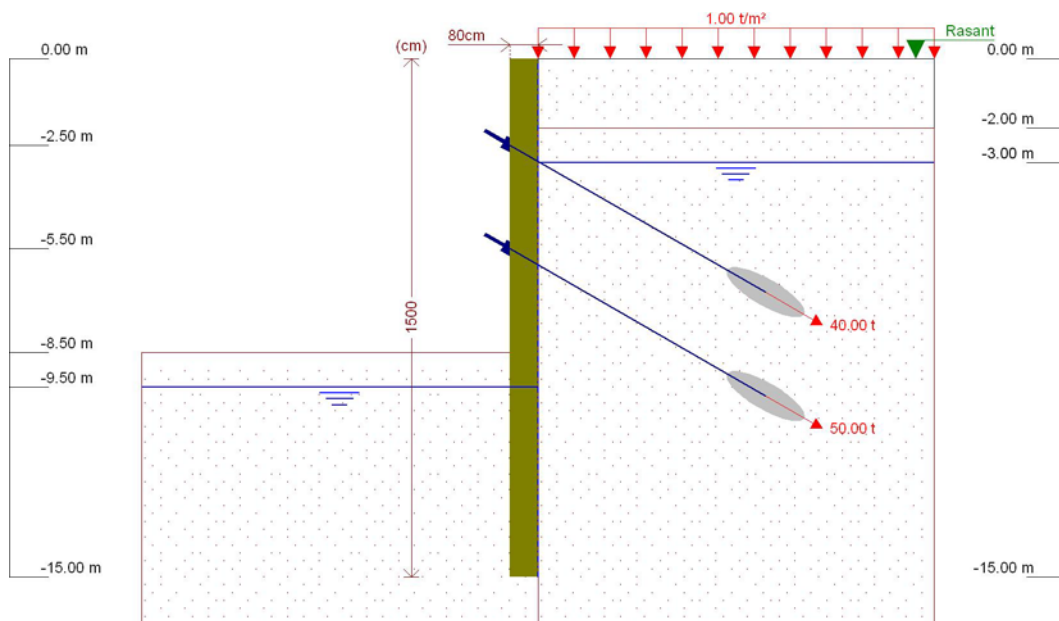
Referències	Nom	Descripció
Fase 3	Fase anclaje 1	Tipus de fase: Constructiva Cota d'excavació: -3.00 m Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -3.00 m



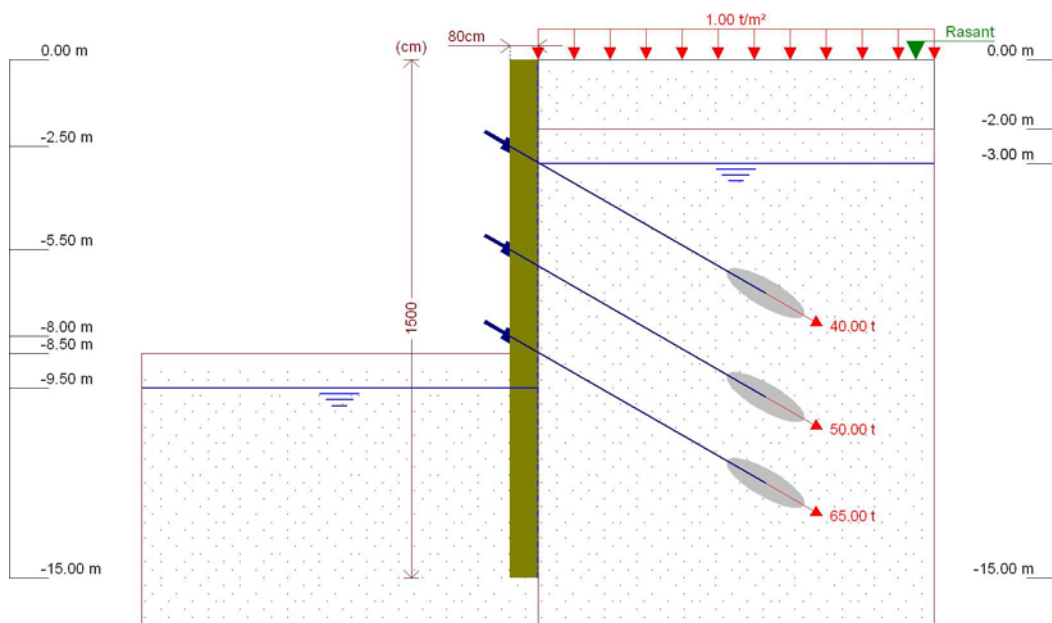
Referències	Nom	Descripció
Fase 4	Fase excavación 2	Tipus de fase: Constructiva Cota d'excavació: -6.00 m Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -7.00 m



Referències	Nom	Descripció
Fase 5	Fase anclaje 2	Tipus de fase: Constructiva Cota d'excavació: -6.00 m Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -7.00 m



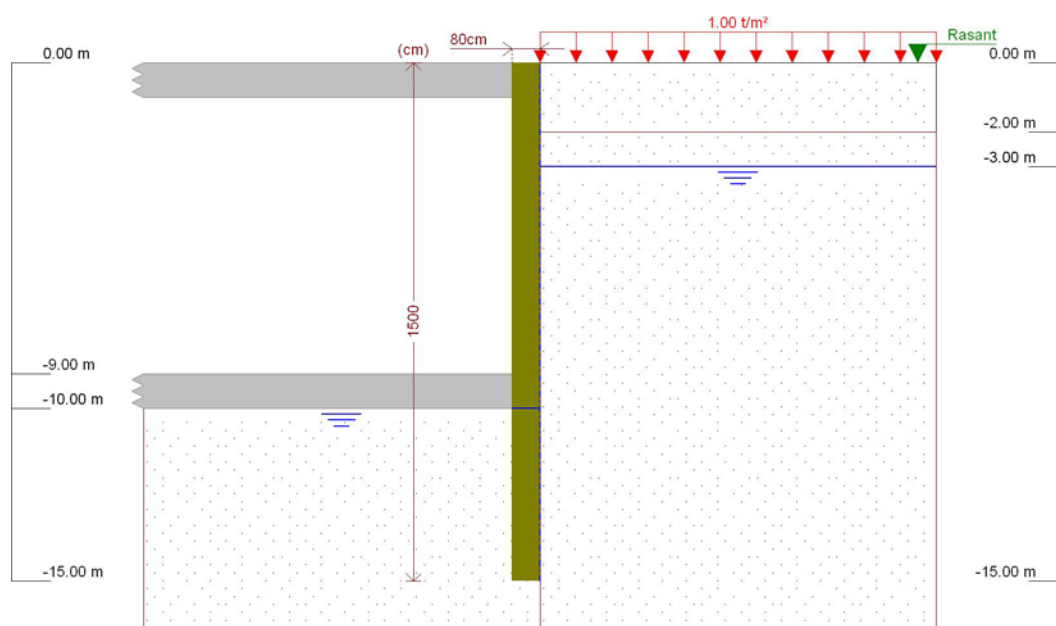
Referències	Nom	Descripció
Fase 6	Fase excavación 3	Tipus de fase: Constructiva Cota d'excavació: -8.50 m Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -9.50 m



Referències	Nom	Descripció
Fase 7	Fase anclaje 3	Tipus de fase: Constructiva Cota d'excavació: -8.50 m Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -9.50 m



Referències	Nom	Descripció
Fase 9	Fase solera	Tipus de fase: Constructiva Cota d'excavació: -10.00 m Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -10.00 m



Referències	Nom	Descripció
Fase 10	Fase final	Tipus de fase: Servei Cota d'excavació: -10.00 m Amb nivell freàtic extradós fins a la cota: -3.00 m Amb nivell freàtic intradós fins a la cota: -10.00 m

## 8.- CÀRREGUES

### CÀRREGUES EN L'EXTRADÓS

Tipus	Cota	Dades	Fase inicial	Fase final
Uniforme	En superfície	Valor: 1 t/m²	Fase inicial	Fase final



## 9.- ELEMENTS DE RECOLZAMENT

### ANCORATGES ACTIUS

Descripció	Fase inicial	Fase final
Cota: -2.50 m Rigidesa axial: 10000 t/m Càrrega: 40.00 t Angle: 30 graus Separació: 2.50 m	Fase anclaje 1	Fase solera
Cota: -5.50 m Rigidesa axial: 10000 t/m Càrrega: 50.00 t Angle: 30 graus Separació: 2.50 m	Fase anclaje 2	Fase solera
Cota: -8.00 m Rigidesa axial: 10000 t/m Càrrega: 65.00 t Angle: 30 graus Separació: 2.50 m	Fase anclaje 3	Fase solera

### FORJATS

Descripció	Fase de construcció	Fase de servei
Cota: -9.00 m Gruix: 100 cm Tallant fase constructiva: 0 t/m Tallant fase de servei: 0 t/m Rigidesa axial: 200000 t/m <sup>2</sup>	Fase solera	Fase final
Cota: 0.00 m Gruix: 100 cm Tallant fase constructiva: 0 t/m Tallant fase de servei: 0 t/m Rigidesa axial: 200000 t/m <sup>2</sup>	Fase final	Fase final

## 10.- RESULTATS DE LES FASES

Esforços sense majorar.

## FASE 1: FASE INICIAL

### BÀSICA

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m <sup>2</sup> )	Pressió hidrostàtica (t/m <sup>2</sup> )
0.00	-0.19	-0.00	0.04	0.00	0.36	0.00
-1.50	-0.19	3.00	0.26	0.23	0.17	0.00
-3.00	-0.20	6.00	-0.30	0.33	0.11	0.00
-4.50	-0.21	9.00	-0.16	0.00	0.08	0.00
-6.00	-0.23	12.00	-0.06	-0.15	0.05	0.00
-7.50	-0.24	15.00	-0.00	-0.18	0.03	0.00
-9.00	-0.24	18.00	0.03	-0.16	0.01	0.00
-10.50	-0.25	21.00	0.04	-0.11	0.00	0.00
-12.00	-0.25	24.00	0.03	-0.05	-0.01	0.00
-13.50	-0.26	27.00	0.02	-0.02	-0.01	0.00
-15.00	-0.26	30.00	0.00	0.00	-0.01	0.00
Màxims	-0.19 Cota: 0.00 m	30.00 Cota: -15.00 m	0.34 Cota: -2.00 m	0.44 Cota: -2.50 m	0.36 Cota: 0.00 m	0.00 Cota: 0.00 m
Mínims	-0.26 Cota: -15.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-0.30 Cota: -3.00 m	-0.18 Cota: -7.50 m	-0.66 Cota: -2.75 m	0.00 Cota: 0.00 m

## FASE 2: FASE EXCAVACIÓN 1

### BÀSICA

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m <sup>2</sup> )	Pressió hidrostàtica (t/m <sup>2</sup> )
0.00	-3.18	-0.00	0.04	-0.00	0.32	0.00
-1.50	-2.79	3.00	1.00	0.69	1.22	0.00
-3.00	-2.42	6.00	1.65	3.08	0.98	0.00
-4.50	-2.11	9.00	0.50	4.82	-0.82	0.00
-6.00	-1.88	12.00	-0.43	4.67	-0.37	0.00
-7.50	-1.74	15.00	-0.78	3.67	-0.08	0.00
-9.00	-1.66	18.00	-0.80	2.45	0.07	0.00
-10.50	-1.63	21.00	-0.64	1.38	0.13	0.00
-12.00	-1.63	24.00	-0.43	0.60	0.15	0.00
-13.50	-1.63	27.00	-0.21	0.14	0.14	0.00
-15.00	-1.64	30.00	0.00	-0.00	0.12	0.00
Màxims	-1.63 Cota: -12.00 m	30.00 Cota: -15.00 m	1.90 Cota: -3.25 m	4.92 Cota: -5.00 m	1.38 Cota: -1.75 m	0.00 Cota: 0.00 m
Mínims	-3.18 Cota: 0.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-0.82 Cota: -8.25 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-1.33 Cota: -3.25 m	0.00 Cota: 0.00 m

**FASE 3: FASE ANCLAJE 1****BÀSICA**

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m²)	Pressió hidrostàtica (t/m²)
0.00	-1.15	-0.00	0.29	0.00	2.34	0.00
-1.50	-1.10	3.00	3.58	2.85	2.92	0.00
-3.00	-1.10	14.00	-4.32	6.19	2.30	0.00
-4.50	-1.22	17.00	-2.38	1.62	0.96	0.00
-6.00	-1.37	20.00	-1.12	-0.79	0.67	0.00
-7.50	-1.50	23.00	-0.29	-1.70	0.40	0.00
-9.00	-1.60	26.00	0.17	-1.70	0.19	0.00
-10.50	-1.67	29.00	0.37	-1.24	0.05	0.00
-12.00	-1.72	32.00	0.38	-0.66	-0.05	0.00
-13.50	-1.76	35.00	0.25	-0.19	-0.12	0.00
-15.00	-1.80	38.00	0.00	0.00	-0.19	0.00
Màxims	-1.08 Cota: -2.25 m	38.00 Cota: -15.00 m	7.40 Cota: -2.50 m	8.61 Cota: -2.50 m	4.75 Cota: -2.00 m	0.00 Cota: 0.00 m
Mínims	-1.80 Cota: -15.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-5.36 Cota: -2.75 m	-1.78 Cota: -8.25 m	-0.19 Cota: -15.00 m	0.00 Cota: 0.00 m

**FASE 4: FASE EXCAVACIÓN 2****BÀSICA**

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m²)	Pressió hidrostàtica (t/m²)
0.00	-0.73	-0.00	0.35	-0.00	2.77	0.00
-1.50	-1.41	3.00	3.71	3.06	2.61	0.00
-3.00	-2.15	15.39	-9.02	3.85	1.25	0.00
-4.50	-2.97	18.39	-6.26	-7.52	1.26	1.50
-6.00	-3.65	21.39	-0.91	-12.58	1.68	3.00
-7.50	-4.10	24.39	1.48	-11.26	-3.25	4.00
-9.00	-4.36	27.39	2.21	-8.29	-3.83	4.00
-10.50	-4.46	30.39	2.18	-4.92	-4.27	4.00
-12.00	-4.47	33.39	1.56	-2.13	-4.55	4.00
-13.50	-4.45	36.39	0.76	-0.51	-4.50	4.00
-15.00	-4.41	39.39	0.00	0.00	-4.43	4.00
Màxims	-0.73 Cota: 0.00 m	39.39 Cota: -15.00 m	6.41 Cota: -2.50 m	8.45 Cota: -2.50 m	3.08 Cota: -2.00 m	4.00 Cota: -7.00 m
Mínims	-4.48 Cota: -11.50 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-9.37 Cota: -2.75 m	-12.58 Cota: -6.00 m	-4.55 Cota: -11.75 m	0.00 Cota: 0.00 m

### FASE 5: FASE ANCLAJE 2

#### BÀSICA

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m²)	Pressió hidrostàtica (t/m²)
0.00	-0.61	-0.00	0.36	-0.00	2.88	0.00
-1.50	-0.90	3.00	4.11	3.33	3.12	0.00
-3.00	-1.26	14.07	-3.85	7.56	2.14	0.00
-4.50	-1.76	17.07	0.47	5.25	2.48	1.50
-6.00	-2.36	30.07	-9.59	3.27	2.98	3.00
-7.50	-3.02	33.07	-3.87	-5.64	-1.08	4.00
-9.00	-3.58	36.07	-0.26	-8.06	-2.29	4.00
-10.50	-4.00	39.07	1.63	-6.60	-3.35	4.00
-12.00	-4.30	42.07	2.02	-3.66	-4.20	4.00
-13.50	-4.53	45.07	1.41	-1.08	-4.67	4.00
-15.00	-4.75	48.07	0.00	-0.00	-5.10	4.00
Màxims	-0.61 Cota: 0.00 m	48.07 Cota: -15.00 m	8.08 Cota: -2.50 m	9.73 Cota: -2.50 m	4.99 Cota: -2.00 m	4.00 Cota: -7.00 m
Mínims	-4.75 Cota: -15.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-11.01 Cota: -5.75 m	-8.06 Cota: -9.00 m	-5.10 Cota: -15.00 m	0.00 Cota: 0.00 m

### FASE 6: FASE EXCAVACIÓN 3

#### BÀSICA

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m²)	Pressió hidrostàtica (t/m²)
0.00	0.36	-0.00	0.48	-0.00	3.86	0.00
-1.50	-0.55	3.00	5.06	4.20	3.47	0.00
-3.00	-1.55	14.19	-3.04	10.00	1.85	0.00
-4.50	-2.73	17.19	0.42	8.27	1.50	1.50
-6.00	-4.07	32.72	-15.81	2.55	1.68	3.00
-7.50	-5.46	35.72	-7.58	-14.32	2.10	4.50
-9.00	-6.59	38.72	1.86	-16.74	-4.56	6.00
-10.50	-7.42	41.72	3.53	-12.33	-5.97	6.50
-12.00	-8.02	44.72	3.71	-6.70	-6.91	6.50
-13.50	-8.51	47.72	2.58	-1.97	-7.73	6.50
-15.00	-8.96	50.72	0.00	-0.00	-8.51	6.50
Màxims	0.36 Cota: 0.00 m	50.72 Cota: -15.00 m	9.31 Cota: -2.50 m	11.73 Cota: -2.50 m	5.40 Cota: -2.00 m	6.50 Cota: -9.50 m
Mínims	-8.96 Cota: -15.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-16.90 Cota: -5.75 m	-17.57 Cota: -8.50 m	-8.51 Cota: -15.00 m	0.00 Cota: 0.00 m

**FASE 7: FASE ANCLAJE 3****BÀSICA**

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m²)	Pressió hidrostàtica (t/m²)
0.00	-0.19	-0.00	0.41	-0.00	3.31	0.00
-1.50	-0.61	3.00	4.61	3.76	3.41	0.00
-3.00	-1.11	13.72	-1.99	9.64	2.29	0.00
-4.50	-1.79	16.72	2.45	10.25	2.45	1.50
-6.00	-2.66	30.07	-8.30	10.86	3.09	3.00
-7.50	-3.73	33.07	2.27	7.25	3.83	4.50
-9.00	-4.94	49.07	-7.79	-0.53	-1.26	6.00
-10.50	-6.15	52.07	-1.59	-6.49	-3.44	6.50
-12.00	-7.24	55.07	1.80	-5.56	-5.35	6.50
-13.50	-8.24	58.07	2.37	-2.03	-7.18	6.50
-15.00	-9.20	61.07	0.00	-0.00	-8.74	6.50
Màxims	-0.19 Cota: 0.00 m	61.07 Cota: -15.00 m	9.07 Cota: -2.50 m	15.37 Cota: -5.50 m	5.72 Cota: -2.00 m	6.50 Cota: -9.50 m
Mínims	-9.20 Cota: -15.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-13.75 Cota: -8.25 m	-6.73 Cota: -11.00 m	-8.74 Cota: -15.00 m	0.00 Cota: 0.00 m

**FASE 8: FASE EXCAVACIÓN 4****BÀSICA**

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m²)	Pressió hidrostàtica (t/m²)
0.00	0.22	-0.00	0.46	0.00	3.72	0.00
-1.50	-0.38	3.00	5.06	4.15	3.64	0.00
-3.00	-1.07	13.54	-0.75	11.27	2.33	0.00
-4.50	-1.96	16.54	3.61	13.71	2.27	1.50
-6.00	-3.12	30.50	-8.62	15.22	2.64	3.00
-7.50	-4.55	33.50	1.05	10.40	3.01	4.50
-9.00	-6.17	51.14	-12.09	-2.96	2.95	6.00
-10.50	-7.75	54.14	0.23	-9.37	-5.31	7.50
-12.00	-9.17	57.14	2.69	-6.60	-7.31	8.00
-13.50	-10.47	60.14	2.71	-2.26	-8.93	8.00
-15.00	-11.72	63.14	0.00	0.00	-10.52	8.00
Màxims	0.22 Cota: 0.00 m	63.14 Cota: -15.00 m	9.86 Cota: -2.50 m	19.86 Cota: -5.50 m	6.22 Cota: -2.00 m	8.00 Cota: -11.00 m
Mínims	-11.72 Cota: -15.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-18.47 Cota: -8.25 m	-9.43 Cota: -10.25 m	-10.52 Cota: -15.00 m	0.00 Cota: 0.00 m

## FASE 9: FASE SOLERA

### BÀSICA

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m²)	Pressió hidrostàtica (t/m²)
0.00	0.21	-0.00	0.46	-0.00	3.70	0.00
-1.50	-0.40	3.00	5.04	4.14	3.62	0.00
-3.00	-1.08	13.57	-0.87	11.16	2.32	0.00
-4.50	-1.97	16.57	3.48	13.42	2.26	1.50
-6.00	-3.12	30.53	-8.77	14.71	2.64	3.00
-7.50	-4.53	33.53	0.91	9.67	3.03	4.50
-9.00	-6.12	51.12	-12.09	-3.77	3.00	6.00
-10.50	-7.65	54.12	0.65	-10.03	-4.48	7.00
-12.00	-9.01	57.12	2.91	-6.72	-6.49	7.00
-13.50	-10.25	60.12	2.72	-2.24	-8.00	7.00
-15.00	-11.44	63.12	0.00	-0.00	-9.46	7.00
Màxims	0.21 Cota: 0.00 m	63.12 Cota: -15.00 m	9.81 Cota: -2.50 m	19.42 Cota: -5.50 m	6.18 Cota: -2.00 m	7.00 Cota: -10.00 m
Mínims	-11.44 Cota: -15.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-18.51 Cota: -8.25 m	-10.19 Cota: -10.25 m	-9.46 Cota: -15.00 m	0.00 Cota: 0.00 m

## FASE 10: FASE FINAL

### BÀSICA

Cota (m)	Desplaçaments (mm)	Llei d'axials (t/m)	Llei de tallants (t/m)	Llei de moment flector (t·m/m)	Llei d'empentes (t/m²)	Pressió hidrostàtica (t/m²)
0.00	0.60	-0.00	0.51	0.00	4.09	0.00
-1.50	-1.36	3.00	-7.62	-8.27	2.66	0.00
-3.00	-3.18	6.00	-5.62	-17.28	0.84	0.00
-4.50	-4.69	9.00	-3.15	-23.90	1.26	1.50
-6.00	-5.76	12.00	2.19	-24.31	1.68	3.00
-7.50	-6.40	15.00	10.42	-14.17	2.10	4.50
-9.00	-6.78	18.00	21.52	10.83	2.52	6.00
-10.50	-7.37	21.00	-7.92	12.67	-3.90	7.00
-12.00	-8.20	24.00	-4.06	4.32	-4.87	7.00
-13.50	-9.11	27.00	-1.38	0.73	-5.72	7.00
-15.00	-10.04	30.00	0.00	-0.00	-6.65	7.00
Màxims	0.60 Cota: 0.00 m	30.00 Cota: -15.00 m	25.87 Cota: -9.50 m	23.21 Cota: -9.50 m	4.09 Cota: 0.00 m	7.00 Cota: -10.00 m
Mínims	-10.04 Cota: -15.00 m	-0.00 Cota: 0.00 m	-13.82 Cota: -9.75 m	-25.15 Cota: -5.25 m	-6.65 Cota: -15.00 m	0.00 Cota: 0.00 m

## 11.- RESULTATS PER ELS ELEMENTS DE SUPORT

Esforços sense majorar.

### Ancoratges actius

Cota: -2.50 m	
Fase	Resultat
Fase anclaje 1	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 40.00 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 16.00 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 34.64 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 13.86 t/m
Fase excavación 2	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 46.96 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 18.78 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 40.67 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 16.27 t/m
Fase anclaje 2	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 40.33 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 16.13 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 34.93 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 13.97 t/m
Fase excavación 3	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 40.97 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 16.39 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 35.48 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 14.19 t/m
Fase anclaje 3	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 38.62 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 15.45 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 33.45 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 13.38 t/m
Fase excavación 4	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 37.71 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 15.08 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 32.66 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 13.06 t/m
Fase solera	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 37.83 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 15.13 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 32.76 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 13.10 t/m

Cota: -5.50 m	
Fase	Resultat
Fase anclaje 2	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 50.00 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 20.00 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 43.30 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 17.32 t/m

Fase excavación 3	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 62.63 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 25.05 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 54.24 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 21.70 t/m
Fase anclaje 3	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 51.73 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 20.69 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 44.80 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 17.92 t/m
Fase excavación 4	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 54.79 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 21.91 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 47.45 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 18.98 t/m
Fase solera	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 54.81 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 21.93 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 47.47 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 18.99 t/m

Cota: -8.00 m	
Fase	Resultat
Fase anclaje 3	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 65.00 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 26.00 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 56.29 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 22.52 t/m
Fase excavación 4	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 73.21 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 29.29 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 63.40 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 25.36 t/m
Fase solera	Càrrega puntual (En la direcció de l'ancoratge): 72.96 t Càrrega lineal (En la direcció de l'ancoratge): 29.19 t/m Càrrega puntual (En projecció horitzontal): 63.19 t Càrrega lineal (En projecció horitzontal): 25.28 t/m

## Forjats

Cota: -9.00 m	
Fase	Resultat
Fase solera	ES PRODUÏX SEPARACIÓ: 0.07 mm
Fase final	Càrrega lineal: 41.98 t/m

Cota: 0.00 m	
Fase	Resultat
Fase final	Càrrega lineal: 12.35 t/m



## 12.- DESCRIPCIÓ DE L'ARMAT

Armat vertical extradós	Armat vertical intradós	Armat base horitzontal	Rigiditzador vertical	Rigiditzador horitzontal
Ø20c/30 Reforços: - Ø12 L(385), D(345) - Ø20 L(425), D(775) D: Distància des de coronació	Ø12c/15 Reforços: - Ø16 L(1145), D(40) D: Distància des de coronació	Ø16c/30	2 Ø20	6 Ø20

## 13.- COMPROVACIONS GEOMÈTRIQUES I DE RESISTÈNCIA

Referència: Zona_Franca_cut_and_cover_3_anclajes (Muro pantalla sistema excavación aire libre)		
Comprovació	Valors	Estat
<b>Recobriment:</b> <i>Norma EHE. Article 37.2.4.</i>	Mínim: 7 cm Calculat: 7 cm	Compleix
<b>Separació lliure mínima armadures horitzontals:</b> <i>Norma EHE-98. Article 66.4.1</i>	Mínim: 2.5 cm Calculat: 28.4 cm	Compleix
<b>Separació màxima armadures horitzontals:</b> <i>Norma EHE, article 42.3.1</i>	Màxim: 30 cm Calculat: 30 cm	Compleix
<b>Quantia mínima geomètrica horitzontal:</b> <i>Article 42.3.5 de la norma EHE</i>	Mínim: 0.0008 Calculat: 0.00083	Compleix
<b>Quantia mínima mecànica horitzontal per cara:</b> <i>Criterio J.Calavera. Murs de contenció i murs de sòtan. (Quantia horitzontal &gt; 20% Quantia vertical)</i>	Mínim: 0.00052 Calculat: 0.00083	Compleix
<b>Longitud de pota horitzontal:</b> <i>La longitud de la pota ha de ser, com a mínim, 12 voltes el diàmetre. Criteri de J. Calavera, "Manual de Detalls Constructius en Obres de Formigó Armat".</i>	Mínim: 19 cm Calculat: 48 cm	Compleix
<b>Quantia mínima geomètrica vertical cara traccionada:</b> <i>Article 42.3.5 de la norma EHE</i>	Mínim: 0.0009	
-Trasdós:	Calculat: 0.0013	Compleix
-Intradós:	Calculat: 0.00094	Compleix
<b>Quantia mínima geomètrica vertical cara comprimida:</b> <i>Article 42.3.5 de la norma EHE</i>	Mínim: 0.00027	
-Trasdós:	Calculat: 0.0013	Compleix
-Intradós:	Calculat: 0.00094	Compleix
<b>Quantia mínima mecànica vertical cara traccionada:</b> <i>Norma EHE, article 42.3.2 (Flexió simple o composta)</i>	Calculat: 0.00261	
-Trasdós:	Mínim: 0.00173	Compleix
-Intradós:	Mínim: 0.00182	Compleix

<p>Quantia mínima mecànica vertical cara comprimida:</p> <p><i>Norma EHE, article 42.3.2 (Flexió simple o composta)</i></p> <p>-Trasdós:</p> <p>-Intradós:</p>	<p>Mínim: 0.00013 Calculat: 0.0013</p> <p>Mínim: 0.00011 Calculat: 0.00261</p>	<p>Compleix</p> <p>Compleix</p>
<p>Quantia màxima geomètrica d'armadura vertical total:</p> <p><i>EC-2, art. 5.4.7.2</i></p>	<p>Màxim: 0.04 Calculat: 0.00523</p>	<p>Compleix</p>
<p>Separació lliure mínima armadures verticals:</p> <p><i>Norma EHE-98. Article 66.4.1</i></p> <p>-Trasdós:</p> <p>-Intradós:</p>	<p>Mínim: 2.5 cm Calculat: 13 cm</p> <p>Calculat: 6.1 cm</p>	<p>Compleix</p> <p>Compleix</p>
<p>Separació màxima entre barres:</p> <p><i>Norma EHE, article 42.3.1</i></p> <p>-Armadura vertical Trasdós:</p> <p>-Armadura vertical Intradós:</p>	<p>Màxim: 30 cm Calculat: 30 cm</p> <p>Calculat: 15 cm</p>	<p>Compleix</p> <p>Compleix</p>
<p>Comprovació a flexió composta:</p> <p><i>Comprovació realitzada per mòdul de pantalla</i></p>		<p>Compleix</p>
<p>Comprovació a tallant:</p> <p>-Criteri norma EHE:</p> <p><i>Article 44.2.3.2.1 (EHE-98)</i></p> <p>-Criteri norma EH-91:</p> <p><i>Article 39.1.3.2.2 (EH-91)</i></p> <p>-Criteri norma EC2:</p> <p><i>Article 4.3.2.3 (EUROCODIG-2)</i></p>	<p>Calculat: 97 t</p> <p>Màxim: 58.12 t</p> <p>Màxim: 107.94 t</p> <p>Màxim: 68.56 t</p>	<p>No compleix</p> <p>Compleix</p> <p>No compleix</p>
<p>Comprovació de fisuració:</p> <p><i>Article 49.2.4 de la norma EHE</i></p>	<p>Màxim: 0.3 mm Calculat: 0.193 mm</p>	<p>Compleix</p>
<p>Longitud d'encavallaments:</p> <p><i>Norma EHE-98. Article 66.6.2</i></p> <p>-Base trasdós:</p> <p>-Base intradós:</p>	<p>Mínim: 0.72 m Calculat: 0.75 m</p> <p>Mínim: 0.42 m Calculat: 0.45 m</p>	<p>Compleix</p> <p>Compleix</p>
<p>Rigiditzadors horitzontals:</p> <p>-Diàmetre mínim:</p> <p><i>Criteri de CYPE Ingenieros. El diàmetre del rigiditzador ha de ser com a mínim igual al major diàmetre de l'armadura base vertical.</i></p> <p>-Separació màxima:</p> <p><i>Criteri NTE. Acondicionament del Terreny, Fonamentacions.</i></p>	<p>Mínim: 20 mm Calculat: 20 mm</p> <p>Màxim: 2.5 m Calculat: 2.5 m</p>	<p>Compleix</p> <p>Compleix</p>

<b>Rigiditzadors verticals:</b>		
-Diàmetre mínim: <i>Criteri de CYPE Ingenieros. El diàmetre del rigiditzador ha de ser com a mínim igual al major diàmetre de l'armadura base vertical.</i>	Mínim: 20 mm Calculat: 20 mm	Compleix
-Separació màxima: <i>Criteri NTE. Acondicionament del Terreny, Fonamentacions.</i>	Màxim: 1.5 m Calculat: 1.25 m	Compleix
Hi han comprovacions que no es compleixen		
<b>Informació adicional:</b>		
- Secció crítica a flexió composta: Cota: -5.25 m, Md: -94.32 t·m, Nd: 0.00 t, Vd: -3.15 t, Tensió màxima de l'acer: 3.319 t/cm <sup>2</sup> - A més de la comprovació de tallant pròpia de la norma, es mostra la comprovació de l'EH-91 i de l'EC2, ja que per gruixos força grans, el criteri de l'EHE pot ser massa restrictiu. - Secció crítica a tallant: Cota: -9.50 m - Secció amb la màxima obertura de fissures: Cota: -9.50 m, M: 58.02 t·m, N: 0.00 t - Els esforços estan majorats i corresponen a l'ample total del tram definit. (Longitud tram: 2.50 m)		

## 14.- COMPROVACIONS D'ESTABILITAT (COEFICIENTS DE SEGURETAT)

Referència: Comprovacions d'estabilitat (Coeficients de seguretat): Zona_Franca_cut_and_cover_3_anclajes (Muro pantalla sistema excavación aire libre)		
Comprovació	Valors	Estat
Relació entre el moment originat per les empentes passives en l'intradós i el moment originat per les empentes actives en l'extradós:		
-Hipòtesi bàsica: <i>Valor introduït per l'usuari.</i>	Mínim: 1.5	
-Fase inicial:	Calculat: 30.608	Compleix
-Fase excavación 1:	Calculat: 11.933	Compleix
-Fase anclaje 1:	Calculat: 16.416	Compleix
-Fase excavación 2:	Calculat: 5.507	Compleix
-Fase anclaje 2 (1)		No procedeix
-Fase excavación 3 (1)		No procedeix
-Fase anclaje 3 (1)		No procedeix
-Fase excavación 4 (1)		No procedeix
-Fase solera (1)		No procedeix
-Fase final (1)		No procedeix

<i>(1)Existeix més de un suport.</i>		
Relació entre l'empenta passiva total en l'intradós i l'empenta realment mobilitzada en l'intradós: <i>Valor introduït per l'usuari.</i>	Mínim: 1.5	
Hipòtesi bàsica:		
-Fase inicial:	Calculat: 11.612	Compleix
-Fase excavación 1:	Calculat: 8.168	Compleix
-Fase anclaje 1:	Calculat: 8.592	Compleix
-Fase excavación 2:	Calculat: 5.106	Compleix
-Fase anclaje 2:	Calculat: 5.47	Compleix
-Fase excavación 3:	Calculat: 2.905	Compleix
-Fase anclaje 3:	Calculat: 3.163	Compleix
-Fase excavación 4:	Calculat: 2.167	Compleix
-Fase solera:	Calculat: 1.821	Compleix
-Fase final:	Calculat: 1.987	Compleix
Es compleixen totes les comprovacions		

## 15.- COMPROVACIONS D'ESTABILITAT (CERCLE DE LLISCAMENT PÈSSIM)

Referència: Comprovacions d'estabilitat (Cercle de lliscament pèssim): Zona_Franca_cut_and_cover_3_anclajes (Muro pantalla sistema excavación aire libre)		
Comprovació	Valors	Estat
Cercle de lliscament pèssim:		
-Combinacions sense sisme: <i>Valor introduït per l'usuari.</i>	Mínim: 1.8	
-Fase excavación 1: Coordenades del centre del cercle (-4.35 m ; 6.20 m) - Radi: 21.70 m:	Calculat: 5.596	Compleix
-Fase anclaje 1: Coordenades del centre del cercle (-4.35 m ; 6.20 m) - Radi: 21.70 m:	Calculat: 5.596	Compleix
-Fase excavación 2: Coordenades del centre del cercle (-4.54 m ; 5.64 m) - Radi: 21.14 m:	Calculat: 3.93	Compleix
-Fase anclaje 2: Coordenades del centre del cercle (-4.54 m ; 5.64 m) - Radi: 21.14 m:	Calculat: 3.93	Compleix
-Fase excavación 3: Coordenades del centre del cercle (-4.39 m ; 4.17 m) - Radi: 19.67 m:	Calculat: 2.735	Compleix

-Fase anclaje 3: Coordenades del centre del cercle (-4.39 m ; 4.17 m) - Radi: 19.67 m:	Calculat: 2.735	Compleix
-Fase excavación 4: Coordenades del centre del cercle (-3.57 m ; 1.27 m) - Radi: 16.77 m:	Calculat: 2.251	Compleix
-Fase solera (1)		No procedeix
-Fase final (1)		No procedeix
(1) No és necessari comprovar l'estabilitat global (cercle de lliscament pèssim) quan en la fase s'ha definit algun forjat.		
<b>Errors</b>		
- Fase inicial: Combinacions sense sisme - No s'ha pogut calcular el cercle de lliscament pèssim.		

## 16.- MEDICIÓ

Refèrència: Mur pantalla de formigó armat		B 500 S, CN			Total
Nom d'armat		Ø12	Ø16	Ø20	
Armat vertical extradós	Longitud (m)			8x4.82	38.56
	Pes (kg)			8x11.89	95.09
Armat vertical extradós	Longitud (m)			8x11.38	91.04
	Pes (kg)			8x28.06	224.52
Armat vertical extradós - Reforços	Longitud (m)			7x4.25	29.75
	Pes (kg)			7x10.48	73.37
Armat vertical extradós - Reforços	Longitud (m)	7x3.85			26.95
	Pes (kg)	7x3.42			23.93
Armat vertical intradós	Longitud (m)	15x4.27			64.05
	Pes (kg)	15x3.79			56.87
Armat vertical intradós	Longitud (m)	14x11.63			162.82
	Pes (kg)	14x10.33			144.56
Armat vertical intradós - Reforços	Longitud (m)		13x11.45		148.85
	Pes (kg)		13x18.07		234.93
Junt lateral positiu	Longitud (m)	8x4.25			34.00
	Pes (kg)	8x3.77			30.19
Junt lateral positiu	Longitud (m)	8x11.63			93.04
	Pes (kg)	8x10.33			82.60
Junt lateral negativa	Longitud (m)	5x4.25			21.25
	Pes (kg)	5x3.77			18.87
Junt lateral negativa	Longitud (m)	5x11.63			58.15
	Pes (kg)	5x10.33			51.63

Armat horitzontal	Longitud (m)		51x2.64		134.64
	Pes (kg)		51x4.17		212.51
Armat horitzontal	Longitud (m)		51x2.64		134.64
	Pes (kg)		51x4.17		212.51
Armat horitzontal	Longitud (m)		51x2.13		108.63
	Pes (kg)		51x3.36		171.45
Armat rigiditzadors verticals	Longitud (m)			2x11.86	23.72
	Pes (kg)			2x29.25	58.50
Armat rigiditzadors verticals	Longitud (m)			2x6.38	12.76
	Pes (kg)			2x15.73	31.47
Armat rigiditzadors verticals	Longitud (m)			2x11.86	23.72
	Pes (kg)			2x29.25	58.50
Armat rigiditzadors verticals	Longitud (m)			2x6.38	12.76
	Pes (kg)			2x15.73	31.47
Armat rigiditzadors horitzontals	Longitud (m)			12x3.78	45.36
	Pes (kg)			12x9.32	111.86
Totals	Longitud (m)	460.26	526.76	277.67	
	Pes (kg)	408.65	831.40	684.78	1924.83
Total amb pèrdues (10.00%)	Longitud (m)	506.29	579.44	305.44	
	Pes (kg)	449.52	914.54	753.25	2117.31

Resum d'amidament (inclui pèrdues d'acer)

Element	B 500 S, CN (kg)				Formigó (m³)	
	Ø12	Ø16	Ø20	Total	HA-30, Control Estadístico	
Referència: Mur pantalla de formigó armat	449.51	914.54	753.26	2117.31		30.00
Totals	449.51	914.54	753.26	2117.31		30.00

## ANEJO C: PRESUPUESTO ALTERNATIVA EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO

### INTRODUCCIÓN

En este anejo se recogen los trabajos realizados para establecer la cuantificación del coste inicial de la construcción del túnel de la alternativa excavación a cielo abierto.

Para llevar a cabo dicha cuantificación se ha utilizado la herramienta TCQ2000 (ITEC) que corresponde a un software para construcción formado por un conjunto de aplicaciones informáticas para dar soporte a las actividades de redacción y control de proyectos y obras. Se ha empleado el módulo de Presupuestos de esta aplicación que permite crear y mantener presupuestos que se organizan en una estructura jerárquica de hasta 9 niveles de desglose en el capitulo de la obra. En TCQ el último nivel corresponde a la línea de presupuesto. A cada línea se le asigna un precio, que procede del banco *Banc de Infraestructures.cat Obra Civil 2015*, se trata del banco de la entidad que gestiona la obra pública en Catalunya.

Para la realización del presupuesto se ha considerado unos costes indirectos del 5% que corresponde a un porcentaje usual para este tipo de infraestructuras en la zona de la ciudad de Barcelona.

### MEDICIONES

Las mediciones se han establecido a partir de los requerimientos y características de la obra así como del resultado del cálculo de dimensionado de la solución que se ha llevado a cabo mediante la aplicación Cype 2011 y que se recoge en el anejo anterior.

**AMIDAMENTS**

Data: 08/06/16

Pàg.: 1

Obra 01 PRESSUPOST ZONA\_FRANCA\_TRAMO2  
 Subobra 01 OBRA CIVIL  
 Capítol 01 PANTALLES

NUM.	CODI	U#	DESCRIPCIÓ
1	G3G5U205	m3	Execució de pantalla de més de 80 cm fins a 100 cm de gruix, amb formigó HA-25 i llots tixotrópics, incloent excavació en qualsevol tipus de terreny amb parts proporcionals de roca amb utilització de trepant, col·locació d'armadures (sense subministrament, elaboració i muntatge d'acer) tot inclòs fins i tot càrrega i transport dels productes de excavació a abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1			2,000	2.600,000	15,000	0,800	62.400,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** **62.400,000**

2 G3GZ0010 m Doble muret guia per a execució de pantalles, de 25 cm de gruix i 70 cm d'alçària, amb formigó de 17,5 N/mm2 de resistència característica a la compressió i armat amb acer B 500 S, inclosa excavació, encofrat i desencofrat

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1	Murets guia pantalles		2,000	2.600,000			5.200,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** **5.200,000**

3 G3GZU015 m Enderroc de doble muret guia d'execució de pantalles, de 25 cm de gruix i 70 cm d'alçària, de formigó armat, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs tall d'armadures, càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1			2,000	2.600,000			5.200,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** **5.200,000**

4 G3GZU020 m2 Repicat de paraments verticals de pantalles per a regularització de superfícies de formigó, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1			2,000	2.600,000	10,000		52.000,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** **52.000,000**

5 G3GZU080 m Enderroc de coronament de pantalla de 80 cm d'amplària, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1			2,000	2.600,000			5.200,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** **5.200,000**

6 G4B0U020 kg Acer B 500 S en barres corrugades de límit elàstic no menor de 500 N/mm2, col·locat

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1	Biga lligat 0.80 m	T	amidament	àrea (m2)	coef, solape	quantia (kg/m2)		
3	Bastaix de 2.50m x 0.80m		5.200,000	0,960	1,150	116,460	668.573,568	C#*D#*E#*F#
6	Pantalles 0,80 m	T	amidament	costats	coef, solape	quantia (kg/u)		

Euro



**AMIDAMENTS**

Data: 08/06/16

Pàg.: 2

7	Bastaix de 2,50m x 0,80m	1.040,000	2,000	1,000	2.117,310	4.404.004,800	C#*D#*E#*F#
---	--------------------------	-----------	-------	-------	-----------	---------------	-------------

TOTAL AMIDAMENT 5.072.578,368

7	G225U102	m3	Excavació de terreny no classificat de buidat entre murs pantalles sota lloses i voltes, amb mitjans mecànics, incloses parts proporcionals de roca, càrrega i transport a abocador, aplec o lloc d'ús, inclòs cànon d'abocament i manteniment de l'abocador				
---	----------	----	--	--	--	--	--

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
2	Recinte entre pantalles		1,150	2.600,000	10,000	10,000	299.000,000	C#*D#*E#*F#

TOTAL AMIDAMENT 299.000,000

Obra	01	PRESSUPOST ZONA_FRANCA_TRAMO2
Subobra	01	OBRA CIVIL
Capítol	02	SOLERA I COBERTA

NUM.	CODI	UA	DESCRIPCIÓ
1	G321U010	m2	Formigó de 15 N/mm2 de resistència característica a la compressió per a capa de neteja de 10 cm de gruix, inclòs la preparació de la base d'assentament, estesa i esquerdejat.

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
2	Coberta del túnel		10,000	2.600,000			26.000,000	C#*D#*E#*F#
5	Solera del túnel		10,000	2.600,000			26.000,000	C#*D#*E#*F#

TOTAL AMIDAMENT 52.000,000

2	G4B0U020	kg	Acer B 500 S en barres corrugades de límit elàstic no menor de 500 N/mm2, col·locat					
---	----------	----	---	--	--	--	--	--

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1		T	Longitud	Amplada (m)	Coef, solap,	quantia (kg/m2)		
3	Coberta túnel		2.600,000	10,000	1,150	150,000	4.485.000,000	C#*D#*E#*F#
6	Solera túnel		2.600,000	10,000	1,150	150,000	4.485.000,000	C#*D#*E#*F#

TOTAL AMIDAMENT 8.970.000,000

3	G4BP0006	u	Ancoratge amb barra d'acer corrugat de 25 mm de diàmetre, incloent perforació, col·locació amb injectat continu amb morter de ciment o resina, en estructura de formigó, segons plànols					
---	----------	---	---	--	--	--	--	--

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1		T	longitud (m)	quantitat/m	amidament			
2								C#*D#*E#*F#
4	Solera túnel		2.600,000	6,000	2,000		31.200,000	C#*D#*E#*F#

TOTAL AMIDAMENT 31.200,000

4	G450U070	m3	Formigó HA-30 per a alçats, piles i taulers, inclòs col·locació, vibrat i curat					
---	----------	----	---	--	--	--	--	--

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1	Forjats (inclosa coberta i solera)	T	Longitud (m)	Amplada (m)	gruix (m)			
3	Coberta		2.600,000	10,000	1,000		26.000,000	C#*D#*E#*F#
6	Solera		2.600,000	10,000	1,000		26.000,000	C#*D#*E#*F#

Euro

**AMIDAMENTS**

Data: 08/06/16

Pàg.: 3

**TOTAL AMIDAMENT** 52.000,000

- 5 G7B1U050 m2 Feltre geotextil no teixit de polipropilè, amb un pes mínim de 300 g/m<sup>2</sup>, 100% foradat per ambdues cares, amb resistència a la perforació igual o superior a 3850 N, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, regularització i anivellament de superfície d'assentament, totalment col·locat

Num.	Text	Típus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1		T	Amidament	Longitud (m)	Alçada (m)	Superfície (m <sup>2</sup> )		
3	Coberta túnel		2,000			26.000,000	52.000,000	C#*D#*E#*F#
5	Impermeabilització perímetre pantalla		2,000	2.600,000	1,500		7.800,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** 59.800,000

- 6 G711U002 m2 Membrana flexible de gruix 1,5 mm d'una làmina bituminosa de quitrà modificat amb cautxú sintètic i resines, protegida amb feltre teixit de polipropilè, incloent emprimació prèvia, per a impermeabilització de tauler de pont, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, totalment acabada

Num.	Text	Típus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1		T	Amidament	perímetre	h (m)	superfície		
3	Coberta túnel		2,000			26.000,000	52.000,000	C#*D#*E#*F#
5	Perímetre pantalles		2,000	2.600,000	1,500		7.800,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** 59.800,000

- 7 G774U010 m2 Làmina drenant de polietilè d'alta densitat amb nòduls de 8 mm d'alçada i malla de HDPE especial per a formigó projectat en túnel, amb resistència a la compressió de 70 kN/m<sup>2</sup>, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, totalment col·locada

Num.	Text	Típus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1		T	Amidament	Longitud (m)	Alçada (m)	Superfície (m <sup>2</sup> )		
3	Coberta pou		2,000			26.000,000	52.000,000	C#*D#*E#*F#
5	Solera		2,000	2.600,000	1,500		7.800,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** 59.800,000

- 8 G4DEU010 m3 Subministrament, muntatge i desmuntatge de cindri, inclosa la preparació de la base

Num.	Text	Típus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
2			4,000	650,000	10,000	10,000	260.000,000	C#*D#*E#*F#

**TOTAL AMIDAMENT** 260.000,000

Obra 01 PRESSUPOST ZONA\_FRANCA\_TRAMO2  
 Subobra 01 OBRA CIVIL  
 Capítol 03 ANCORATGES

NUM.	CODI	U#	DESCRIPCIÓ
1	G3L1U300	m	Perforació d'ancoratge provisional o permanent en qualsevol tipus de terreny

Num.	Text	Típus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
2	1ª fila ancoratges		2,000	8,000	1.040,000		16.640,000	C#*D#*E#*F#

Euro

**AMIDAMENTS**

Data: 08/06/16

Pàg.: 4

4	2ª fila ancoratges	2,000	13,000	1.040,000	27.040,000	C#*D#*E#*F#
6	3ª fila ancoratges	2,000	16,000	1.040,000	33.280,000	C#*D#*E#*F#

TOTAL AMIDAMENT 76.960,000

- 2 G3L1U400 kg Acer Y 1770 S2 en cordons per a pretesar en ancoratges permanents al terreny, inclouent-hi ancoratges, beina, injecció de beurada, accessoris i tesat, inclòs part proporcional de cap d'ancoratge

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
2	1ª fila de ancoratges		2,000	8,000	1.040,000	7,710	128.294,400	C#*D#*E#*F#
4	2ª fila de ancoratges		2,000	13,000	1.040,000	7,710	208.478,400	C#*D#*E#*F#
6	3ª fila de ancoratges		2,000	18,000	1.040,000	7,710	288.662,400	C#*D#*E#*F#

TOTAL AMIDAMENT 625.435,200

Obra 01 PRESSUPOST ZONA\_FRANCA\_TRAMO2  
Subobra 02 VARIS

NUM.	COOI	UA	DESCRIPCIÓ
1	YADMC005	UNT	Implantació de les instal·lacions de bombeig a la zona del recinte entre pantalles, segons protocol de bombeig.

AMIDAMENT DIRECTE 4,000

- 2 YADMC006 MES Manteniment mensual del nivell freàtic rebaixat durant l'execució de les obres. Inclou sistema de seguiment d'assentaments, elements per a control del nivell freàtic, sistema d'avis mitjançant SMS als responsables de l'obra i recollida de l'aigua a instal·lació de tractament o zona d'abocament segons protocol de bombeig.

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1			1,000	12,000			12,000	C#*D#*E#*F#

TOTAL AMIDAMENT 12,000

- 3 G261VP01 M Perforació de pou de bombament realitzat pel sistema de rotoperкусиó clavant simultàniament la tuberia provisional recuperable d'acer de 600 mm de diàmetre, encamisat inferior de tub ranurat de 300 mm. Inclou tots els corresponents treballs de col·locació al pou de l'esmentada camisa provisional, els treballs de la seva posterior extracció, el demèrit de la mateixa, la presa i classificació de les mostres del terreny perforat, així com l'assentament del reblliment de grava 3-5 mm i la neteja final del pou mitjançant la cullera de la vàlvula del tren de sondeigs.

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1		T	Número	Profundidad				C#*D#*E#*F#
2	Primer recinte							
3	Pous interiors		12,000	15,000			180,000	C#*D#*E#*F#
4	Pous exteriors		6,000	20,000			120,000	C#*D#*E#*F#
5	Assaig		1,000	20,000			20,000	C#*D#*E#*F#
7	Segon recinte							
8	Pous interiors		12,000	15,000			180,000	C#*D#*E#*F#
9	Pous exteriors		6,000	20,000			120,000	C#*D#*E#*F#
10	Assaig		1,000	20,000			20,000	C#*D#*E#*F#
12	Tercer recinte							
13	Pous interiors		12,000	15,000			180,000	C#*D#*E#*F#

Euro

**AMIDAMENTS**

Data: 08/06/16

Pàg.: 5

14	Pous exteriors	6,000	20,000	120,000	C#D#E#F#
15	Assaig	1,000	20,000	20,000	C#D#E#F#
17	Quart recinte				
18	Pous interiors	12,000	15,000	180,000	C#D#E#F#
19	Pous exteriors	6,000	20,000	120,000	C#D#E#F#
20	Assaig	1,000	20,000	20,000	C#D#E#F#

TOTAL AMIDAMENT 1.280,000

4 YADMC007 M Segellat de pou seguint la metodologia i les prescripcions de l'Agència Catalana de l'Aigua.

Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1		T	Número	Profundidad				C#D#E#F#
2	Primer recinte							
3	Pous interiors		12,000	15,000			180,000	C#D#E#F#
4	Pous exteriors		6,000	20,000			120,000	C#D#E#F#
5	Assaig		1,000	20,000			20,000	C#D#E#F#
7	Segon recinte							
8	Pous interiors		12,000	15,000			180,000	C#D#E#F#
9	Pous exteriors		6,000	20,000			120,000	C#D#E#F#
10	Assaig		1,000	20,000			20,000	C#D#E#F#
12	Tercer recinte							
13	Pous interiors		12,000	15,000			180,000	C#D#E#F#
14	Pous exteriors		6,000	20,000			120,000	C#D#E#F#
15	Assaig		1,000	20,000			20,000	C#D#E#F#
17	Quart recinte							
18	Pous interiors		12,000	15,000			180,000	C#D#E#F#
19	Pous exteriors		6,000	20,000			120,000	C#D#E#F#
20	Assaig		1,000	20,000			20,000	C#D#E#F#

TOTAL AMIDAMENT 1.280,000

Obra 01 PRESSUPOST ZONA\_FRANCA\_TRAMO2  
Subobra 03 PARTIDES ALÇADES

NUM.	CODI	UA	DESCRIPCIÓ
1	XPA912AC	pa	PARTIDA ALÇADA A JUSTIFICAR DE L'1% DEL PEM DE L'OBRA, PER A DESPESES D'ACCIÓ CULTURAL, SEGONS DECRET 111/1986

AMIDAMENT DIRECTE 1,000

2 PPA012SS pa Partida alçada de cobrament íntegra per a la Seguretat i Salut a l'obra

AMIDAMENT DIRECTE 1,000

3 PPA80001 pa Partida alçada de cobrament íntegra per a la seguretat vial, senyalització, abalisament i desviaments provisionals durant l'execució de les obres, segons indicació de la Direcció de l'Obra

Euro

**AMIDAMENTS**

Data: 08/06/16

Pàg.: 6

				AMIDAMENT DIRECTE		1,000		
4	XPA99IMP	pa	Partida alçada a justificar per desviament de serveis					
				AMIDAMENT DIRECTE		1,000		
5	ZINTCC05	M2	Reurbanització de la zona afectada per les obres					
Num.	Text	Tipus	[C]	[D]	[E]	[F]	TOTAL	Fórmula
1	Àrea afectada per les obres							
2	Carrer Lletra A Zona Franca			2.600,000	10,000		26.000,000	C#*D#*E#*F#
				TOTAL AMIDAMENT		26.000,000		

**CUADRO DE PRECIOS**

Los precios utilizados proceden del banco *Banc de Infraestructures.cat Obra Civil 2015*.

**QUADRE DE PREUS NÚMERO 1**

Data: 08/06/16

Pàg.: 1

NÚMERO	CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	
P-1	G225U102	m3	Excavació de terreny no classificat de buidat entre murs pantalles sota lloses i voltes, amb mitjans mecànics, incloses parts proporcionals de roca, càrrega i transport a abocador, aplec o lloc d'ús, inclòs cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (QUATRE EUROS AMB VUITANTA-TRES CENTIMS)	4,83	€
P-2	G261VP01	M	Perforació de pou de bombament realitzat pel sistema de rotopercussió clavant simultàniament la tuberia provisional recuperable d'acer de 600 mm de diàmetre, encamisat inferior de tub ranurat de 300 mm. Inclosos tots els corresponents treballs de col·locació al pou de l'esmentada camisa provisional, els treballs de la seva posterior extracció, el demèrit de la mateixa, la presa i classificació de les mostres del terreny perforat, així com l'assentament del rebliment de grava 3-5 mm i la neteja final del pou mitjançant la cullera de la vàlvula del tren de sondeigs. (VUIT-CENTS SETANTA-VUIT EUROS AMB SIS CENTIMS)	878,06	€
P-3	G3G5U205	m3	Execució de pantalla de més de 80 cm fins a 100 cm de gruix, amb formigó HA-25 i llots tixotrópics, incloent excavació en qualsevol tipus de terreny amb parts proporcionals de roca amb utilització de trepant, col·locació d'armadures (sense subministrament, elaboració i muntatge d'acer) tot inclòs fins i tot càrrega i transport dels productes de excavació a abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (CENT SEIXANTA-DOS EUROS AMB SEIXANTA-QUATRE CENTIMS)	162,64	€
P-4	G3GZ0010	m	Doble muret guia per a execució de pantalles, de 25 cm de gruix i 70 cm d'alçària, amb formigó de 17,5 N/mm2 de resistència característica a la compressió i armat amb acer B 500 S, inclosa excavació, encofrat i desencofrat (CENT VINT-I-SET EUROS AMB QUARANTA-CINC CENTIMS)	127,45	€
P-5	G3GZU015	m	Enderroc de doble muret guia d'execució de pantalles, de 25 cm de gruix i 70 cm d'alçària, de formigó armat, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs tall d'armadures, càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (SETZE EUROS AMB VINT-I-NOU CENTIMS)	16,29	€
P-6	G3GZU020	m2	Repicat de paraments verticals de pantalles per a regularització de superfícies de formigó, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (DEU EUROS AMB VUITANTA-QUATRE CENTIMS)	10,84	€
P-7	G3GZU080	m	Enderroc de coronament de pantalla de 80 cm d'amplària, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (VUITANTA-CINC EUROS AMB SETANTA CENTIMS)	85,70	€

**QUADRE DE PREUS NÚMERO 1**

Data: 08/06/16

Pàg.: 2

NÚMERO	CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	
P-8	G3L1U300	m	Perforació d'ancoratge provisional o permanent en qualsevol tipus de terreny (QUARANTA-SET EUROS AMB VINT-I-VUIT CENTIMS)	47,28	€
P-9	G3L1U400	kg	Acer Y 1770 S2 en cordons per a pretesar en ancoratges permanents al terreny, incloent-hi ancoratges, beina, injecció de beurada, accessoris i tesat, inclòs part proporcional de cap d'ancoratge (NOU EUROS AMB VUITANTA-CINC CENTIMS)	9,85	€
P-10	G3Z1U010	m2	Formigó de 15 N/mm2 de resistència característica a la compressió per a capa de neteja de 10 cm de gruix, inclòs la preparació de la base d'assentament, estesa i esquerdejat. (NOU EUROS AMB TRENTA CENTIMS)	9,30	€
P-11	G450U070	m3	Formigó HA-30 per a alçats, piles i taulers, inclòs col·locació, vibrat i curat (NORANTA-SIS EUROS AMB QUARANTA-VUIT CENTIMS)	96,48	€
P-12	G4B0U020	kg	Acer B 500 S en barres corrugades de límit elàstic no menor de 500 N/mm2, col·locat (UN EUROS AMB QUATRE CENTIMS)	1,04	€
P-13	G4BP0006	u	Ancoratge amb barra d'acer corrugat de 25 mm de diàmetre, incloent perforació, col·locació amb injectat continu amb morter de ciment o resina, en estructura de formigó, segons plànols (TRENTA-QUATRE EUROS AMB NORANTA-CINC CENTIMS)	34,95	€
P-14	G4DEU010	m3	Subministrament, muntatge i desmuntatge de cindri, inclosa la preparació de la base (DOTZE EUROS AMB SIS CENTIMS)	12,06	€
P-15	G711U002	m2	Membrana flexible de gruix 1,5 mm d'una làmina bituminosa de quitrà modificat amb cautxú sintètic i resines, protegida amb feltre teixit de polipropilè, incloent emprimació prèvia, per a impermeabilització de tauler de pont, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, totalment acabada (CATORZE EUROS AMB QUARANTA-UN CENTIMS)	14,41	€
P-16	G774U010	m2	Làmina drenant de polietilè d'alta densitat amb nòduls de 8 mm d'alçada i malla de HDPE especial per a formigó projectat en túnel, amb resistència a la compressió de 70 kN/m2, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, totalment col·locada (VINT-I-SIS EUROS AMB NORANTA-SIS CENTIMS)	26,96	€
P-17	G7B1U050	m2	Feltre geotextil no teixit de polipropilè, amb un pes mínim de 300 g/m2, 100% foradat per ambdues cares, amb resistència a la perforació igual o superior a 3850 N, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, regularització i anivellament de superfície d'assentament, totalment col·locat (TRES EUROS AMB SETANTA-DOS CENTIMS)	3,72	€
P-18	PPA012SS	pa	Partida alçada de cobrament íntegra per a la Seguretat i Salut a l'obra (CINC-CENTS MIL EUROS)	500.000,00	€

**QUADRE DE PREUS NÚMERO 1**

Data: 08/06/16

Pàg.: 3

NÚMERO	CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU
P-19	PPA80001	pa	Partida alçada de cobrament íntegre per a la seguretat vial, senyalització, abalisament i desviaments provisionals durant l'execució de les obres, segons indicació de la Direcció de l'Obra (DOS-CENTS CINQUANTA MIL EUROS)	250.000,00 €
P-20	YADMC005	UNT	Implantació de les instal·lacions de bombeig a la zona del recinte entre pantalles, segons protocol de bombeig. (SETANTA MIL EUROS)	70.000,00 €
P-21	YADMC006	MES	Manteniment mensual del nivell freàtic rebaixat durant l'execució de les obres. Inclou sistema de seguiment d'assentaments, elements per a control del nivell freàtic, sistema d'avis mitjançant SMS als responsables de l'obra i recollida de l'aigua a instal·lació de tractament o zona d'abocament segons protocol de bombeig. (QUINZE MIL CENT NOU EUROS)	15.109,00 €
P-22	YADMC007	M	Segellat de pou seguint la metodologia i les prescripcions de l'Agència Catalana de l'Aigua. (CENT SET EUROS AMB QUARANTA CENTIMS)	107,40 €
P-23	ZINTCC05	M2	Reurbanització de la zona afectada per les obres (CENT SETANTA-CINC EUROS)	175,00 €



**QUADRE DE PREUS NÚMERO 2**

Data: 08/06/16

Pàg.: 1

NÚMERO	CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	
P-1	G225U102	m3	Excavació de terreny no classificat de buidat entre murs, pantalles sota lloses i voltes, amb mitjans mecànics, inclosos parts proporcionals de roca, càrrega i transport a abocador, aplec o lloc d'ús, inclòs cànon d'abocament i manteniment de l'abocador	4,83	€
			Altres conceptes	4,83000	€
P-2	G261VP01	M	Perforació de pou de bombament realitzat pel sistema de rotopercussió clavant simultàniament la tuberia provisional recuperable d'acer de 600 mm de diàmetre, encamisat inferior de tub ranurat de 300 mm. Inclosos tots els corresponents treballs de col·locació al pou de l'esmentada camisa provisional, els treballs de la seva posterior extracció, el demèrit de la mateixa, la presa i classificació de les mostres del terreny perforat, així com l'assentament del rebliment de graves 3-5 mm i la neteja final del pou mitjançant la cullera de la vàlvula del tren de sondeigs.	878,06	€
			Sense descomposició	878,06000	€
P-3	G3G5U205	m3	Execució de pantalla de més de 80 cm fins a 100 cm de gruix, amb formigó HA-25 i llots tixotròpics, incloent excavació en qualsevol tipus de terreny amb parts proporcionals de roca amb utilització de trepant, col·locació d'armadures (sense subministrament, elaboració i muntatge d'acer) tot inclòs fins i tot càrrega i transport dels productes de excavació a abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador	162,64	€
	B3Z5U005	m	Amortització de tub metàl·lic amb tolva per a formigonat de pantalles	0,37868	€
	B3Z5U004	m	Amortització d'encofrat metàl·lic per a junt de pantalles	1,13610	€
	B3Z5U000	m3	Llot tixotròpic	10,59060	€
	B0D31000	m3	Llata de fusta de pi	1,06420	€
	B060U440	m3	Formigó HA-25, consistència fluida i granulat màxim 20 mm, inclòs transport a l'obra	78,78540	€
			Altres conceptes	70,68502	€
P-4	G3GZ0010	m	Doble muret guia per a execució de pantalles, de 25 cm de gruix i 70 cm d'alçària, amb formigó de 17,5 N/mm2 de resistència característica a la compressió i armat amb acer B 500 S, inclosa excavació, encofrat i desencofrat	127,45	€
	B0DZA000	I	Desencofrant	0,57750	€
	B0DZU005	u	Materials auxiliars per a encofrar	1,60160	€
	B0D7UC02	m2	Amortització de tauler de fusta de pi de 22 mm, per a 10 usos	3,61200	€
	B0B2AU01	kg	Acer corrugat B 500 S elaborat a mida	12,43200	€
	B060U120	m3	Formigó de 17,5 N/mm2 de resistència característica a la compressió, consistència plà	20,53100	€
	B0A142U0	kg	Filferro recuit de diàmetre 1,6 mm	0,19992	€
	B0D21030	m	Tauló de fusta de pi per a 10 usos	5,00200	€
			Altres conceptes	83,49398	€
P-5	G3GZU015	m	Enderroc de doble muret guia d'execució de pantalles, de 25 cm de gruix i 70 cm d'alçària, de formigó armat, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs tall d'armadures, càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador	16,29	€

**QUADRE DE PREUS NÚMERO 2**

Data: 08/06/16

Pàg.: 2

NÚMERO	CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	
			Altres conceptes	16,29000	€
P-6	G3GZU020	m2	Repicat de paraments verticals de pantalles per a regularització de superfícies de formigó, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador	10,84	€
			Altres conceptes	10,84000	€
P-7	G3GZU080	m	Enderroc de coronament de pantalla de 80 cm d'amplària, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador	85,70	€
			Altres conceptes	85,70000	€
P-8	G3L1U300	m	Perforació d'ancoratge provisional o permanent en qualsevol tipus de terreny	47,28	€
	B021U001	u	Material auxiliar de perforació	0,21000	€
	B3Z5U000	m3	Llot tixotrópic	0,18580	€
			Altres conceptes	46,88420	€
P-9	G3L1U400	kg	Acer Y 1770 S2 en cordons per a pretesar en ancoratges permanents al terreny, incloent-hi ancoratges, beina, injecció de beurada, accessoris i tesat, inclòs part proporcional de cap d'ancoratge	9,85	€
	B05A1000	l	Beurada de ciment per a injectar	0,84000	€
	B0ADU001	u	Ancoratge actiu i accessoris	1,74925	€
	B0B21000	kg	Acer per a tesar Y 1770 S2 en cordons	0,88200	€
	B0AEU003	m	Beina de tub de polietilè de 75 mm de diàmetre i 10 atm	1,95650	€
	B0AEU002	m	Beina de tub de polietilè de 20 mm de diàmetre	0,84460	€
			Altres conceptes	3,57765	€
P-10	G3Z1U010	m2	Formigó de 15 N/mm2 de resistència característica a la compressió per a capa de neteja de 10 cm de gruix, inclòs la preparació de la base d'assentament, estesa i esquerdejat	9,30	€
	B060U110	m3	Formigó de 15 N/mm2 de resistència característica a la compressió, consistència plàst	7,16625	€
			Altres conceptes	2,13375	€
P-11	G450U070	m3	Formigó HA-30 per a alçats, piles i taulers, inclòs col·locació, vibrat i curat	96,48	€
	B060U450	m3	Formigó HA-30, consistència fluida i granulat màxim 20 mm, inclòs transport a l'obra	76,58700	€
			Altres conceptes	19,89300	€
P-12	G4B0U020	kg	Acer B 500 S en barres corrugades de límit elàstic no menor de 500 N/mm2, col·locat	1,04	€
	B0B2U002	kg	Acer en barres corrugades B 500 S de límit elàstic $\geq$ 500 N/mm2	0,65100	€
	B0A142U0	kg	Filferro recuit de diàmetre 1,6 mm	0,01190	€
			Altres conceptes	0,37710	€
P-13	G4BP0006	u	Ancoratge amb barra d'acer corrugat de 25 mm de diàmetre, incloent perforació, col·locació amb injectat continu amb morter de ciment o resina, en estructura de formigó, segons plànols	34,95	€
	B0AAU101	u	Cartutx de resina per a empalmes	2,60000	€
	B021U001	u	Material auxiliar de perforació	0,21000	€
	B0B2AU01	kg	Acer corrugat B 500 S elaborat a mida	5,99400	€
			Altres conceptes	26,14600	€

**QUADRE DE PREUS NÚMERO 2**

Data: 08/06/16

Pàg.: 3

NÚMERO	CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	
P-14	G4DEU010	m3	Subministrament, muntatge i desmuntatge de cindri, inclosa la preparació de la base	12,06	€
	B032U010	m3	Sauló sense garbellar, inclòs cànon per extracció i transport a l'obra	0,47355	€
	B0D21030	m	Tauló de fusta de pi per a 10 usos	0,06150	€
	B0DFU001	m3	Amortització de cindri metàl·lica	7,38000	€
			Altres conceptes	4,14495	€
P-15	G711U002	m2	Membrana flexible de gruix 1,5 mm d'una làmina bituminosa de quitrà modificat amb cautxú sintètic i resines, protegida amb feltre teixit de polipropilè, incloent imprimació prèvia, per a impermeabilització de tauler de pont, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, totalment acabada	14,41	€
	B711U010	m2	Làmina bituminosa de quitrà modificat amb cautxú sintètic i resines, amb feltre teixit de	11,18700	€
	B055U024	kg	Emulsió bituminosa catiònica al 50% de betum, tipus C50BF5 IMP	0,19800	€
			Altres conceptes	3,02500	€
P-16	G774U010	m2	Làmina drenant de polietilè d'alta densitat amb nòduls de 8 mm d'alçada i malla de HDPE especial per a formigó projectat en túnel, amb resistència a la compressió de 70 kN/m2, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, totalment col·locada	26,96	€
	B7Z1U010	m	Banda autoadhesiva de cautxú butil de 4 cm d'amplària per a segellat de làmina de pol	0,80000	€
	B7Z1U002	u	Clau adhesiu per a fixació de làmina de polietilè amb nòduls	7,20000	€
	B774U010	m2	Làmina drenant de polietilè d'alta densitat amb nòduls de 8 mm d'alçada i malla de HD	12,27600	€
			Altres conceptes	6,68400	€
P-17	G7B1U050	m2	Feltre geotextil no teixit de polipropilè, amb un pes mínim de 300 g/m2, 100% foradat per ambdues cares, amb resistència a la perforació igual o superior a 3850 N, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, regularització i anivellament de superfície d'assentament, totalment col·locat	3,72	€
	B7B1U005	m2	Feltre geotextil no teixit de polipropilè, amb un pes mínim de 300 g/m2, 100% foradat p	2,75000	€
			Altres conceptes	0,97000	€
P-18	PPA012SS	pa	Partida alçada de cobrament íntegra per a la Seguretat i Salut a l'obra	500.000,00	€
			Sense descomposició	500.000,00000	€
P-19	PPA80001	pa	Partida alçada de cobrament íntegre per a la seguretat vial, senyalització, abalisament i desviaments provisionals durant l'execució de les obres, segons indicació de la Direcció de l'Obra	250.000,00	€
			Sense descomposició	250.000,00000	€
P-20	YADMC005	UNT	Implantació de les instal·lacions de bombeig a la zona del recinte entre pantalles, segons protocol de bombeig.	70.000,00	€
			Sense descomposició	70.000,00000	€
P-21	YADMC006	MES	Manteniment mensual del nivell freàtic rebaixat durant l'execució de les obres. Inclou sistema de seguiment d'assentaments, elements per a control del nivell freàtic, sistema d'avis mitjançant SMS als responsables de l'obra i recollida de l'aigua a instal·lació de tractament o zona d'abocament segons protocol de bombeig.	15.109,00	€

**QUADRE DE PREUS NÚMERO 2**

Data: 08/06/16

Pàg.: 4

NÚMERO	CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU
			Sense descomposició	15.109,00000 €
P-22	YADMC007	M	Segellat de pou seguint la metodologia i les prescripcions de l'Agència Catalana de l'Aigua.	<b>107,40</b> €
			Sense descomposició	107,40000 €
P-23	ZINTCC05	M2	Reurbanització de la zona afectada per les obres	<b>175,00</b> €
			Sense descomposició	175,00000 €

**PRESUPUESTO**

A partir de las mediciones y los precios unitarios del banco de precios se ha elaborado el presupuesto de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto.

**PRESSUPOST**

Data: 08/06/16

Pàg.: 1

Obra	01	Pressupost ZONA_FRANCA_TRAMO2
Subobra	01	Obra Civil
Capítol	01	Pantalles

NUM. CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	AMIDAMENT	IMPORT	
1	G3G5U205	m3	Execució de pantalla de més de 80 cm fins a 100 cm de gruix, amb formigó HA-25 i llots tixotrópics, incloent excavació en qualsevol tipus de terreny amb parts proporcionals de roca amb utilització de trepant, col·locació d'armadures (sense subministrament, elaboració i muntatge d'acer) tot inclòs fins i tot càrrega i transport dels productes de excavació a abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (P - 3)	162,64	62.400,000	10.148.736,00
2	G3GZ0010	m	Doble muret guia per a execució de pantalles, de 25 cm de gruix i 70 cm d'alçària, amb formigó de 17,5 N/mm2 de resistència característica a la compressió i armat amb acer B 500 S, inclosa excavació, encofrat i desencofrat (P - 4)	127,45	5.200,000	662.740,00
3	G3GZU015	m	Enderroc de doble muret guia d'execució de pantalles, de 25 cm de gruix i 70 cm d'alçària, de formigó armat, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs tall d'armadures, càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (P - 5)	16,29	5.200,000	84.708,00
4	G3GZU020	m2	Repicat de paraments verticals de pantalles per a regularització de superfícies de formigó, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (P - 6)	10,84	52.000,000	563.680,00
5	G3GZU080	m	Enderroc de coronament de pantalla de 80 cm d'amplària, amb mitjans mecànics o manuals, inclòs càrrega, transport a l'abocador, cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (P - 7)	85,70	5.200,000	445.640,00
6	G4B0U020	kg	Acer B 500 S en barres corrugades de límit elàstic no menor de 500 N/mm2, col·locat (P - 12)	1,04	5.072.578,368	5.275.481,50
7	G225U102	m3	Excavació de terreny no classificat de buidat entre murs pantalles sota lloses i voltes, amb mitjans mecànics, incloses parts proporcionals de roca, càrrega i transport a abocador, aplec o lloc d'ús, inclòs cànon d'abocament i manteniment de l'abocador (P - 1)	4,83	299.000,000	1.444.170,00
TOTAL	Capítol	01.01.01			18.625.155,50	

Obra	01	Pressupost ZONA_FRANCA_TRAMO2
Subobra	01	Obra Civil
Capítol	02	Solera i coberta

NUM. CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	AMIDAMENT	IMPORT	
1	G3Z1U010	m2	Formigó de 15 N/mm2 de resistència característica a la compressió per a capa de neteja de 10 cm de gruix, inclòs la preparació de la base d'assentament, estesa i esquarterjat. (P - 10)	9,30	52.000,000	483.600,00
2	G4B0U020	kg	Acer B 500 S en barres corrugades de límit elàstic no menor de 500 N/mm2, col·locat (P - 12)	1,04	8.970.000,000	9.328.800,00
3	G4BP0006	u	Ancoratge amb barra d'acer corrugat de 25 mm de diàmetre, incloent perforació, col·locació amb injectat continu amb morter de ciment o resina, en estructura de formigó, segons plànols (P - 13)	34,95	31.200,000	1.090.440,00
4	G450U070	m3	Formigó HA-30 per a alçats, piles i taulers, inclòs col·locació, vibrat i curat (P - 11)	96,48	52.000,000	5.016.960,00
5	G7B1U050	m2	Feltre geotextil no teixit de polipropilè, amb un pes mínim de 300 g/m2, 100% foradat per ambdues cares, amb resistència a la perforació igual o superior a 3850 N, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, regularització i anivellament de superfície d'assentament, totalment col·locat (P - 17)	3,72	59.800,000	222.456,00
6	G711U002	m2	Membrana flexible de gruix 1,5 mm d'una làmina bituminosa de quitrà modificat amb cautxú sintètic i resines, protegida amb feltre teixit de polipropilè, incloent emprimació prèvia, per a impermeabilització de	14,41	59.800,000	861.718,00

euros

**PRESSUPOST**

Data: 08/06/16

Pàg.: 2

			tauler de pont, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, totalment acabada (P - 15)			
7	G774U010	m2	Làmina drenant de polietilè d'alta densitat amb nòduls de 8 mm d'alçada i malla de HDPE especial per a formigó projectat en túnel, amb resistència a la compressió de 70 kN/m2, inclòs pèrdues per retalls i encavalcaments, totalment col·locada (P - 16)	26,96	59.800,000	1.612.208,00
8	G4DEU010	m3	Subministrament, muntatge i desmuntatge de cindri, inclosa la preparació de la base (P - 14)	12,06	260.000,000	3.135.600,00

<b>TOTAL</b>	<b>Capítol</b>	<b>01.01.02</b>				<b>21.751.782,00</b>
--------------	----------------	-----------------	--	--	--	----------------------

Obra	01	Pressupost ZONA_FRANCA_TRAMO2
Subobra	01	Obra Civil
Capítol	03	Ancoratges

NUM. CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	AMIDAMENT	IMPORT	
1	G3L1U300	m	Perforació d'ancoratge provisional o permanent en qualsevol tipus de terreny (P - 8)	47,28	76.960,000	3.638.668,80
2	G3L1U400	kg	Acer Y 1770 S2 en cordons per a pretesar en ancoratges permanents al terreny, incloent-hi ancoratges, beina, injecció de beurada, accessoris i tesat, inclòs part proporcional de cap d'ancoratge (P - 9)	9,85	625.435,200	6.160.536,72

<b>TOTAL</b>	<b>Capítol</b>	<b>01.01.03</b>				<b>9.799.205,52</b>
--------------	----------------	-----------------	--	--	--	---------------------

Obra	01	Pressupost ZONA_FRANCA_TRAMO2
Subobra	02	Varis

NUM. CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	AMIDAMENT	IMPORT	
1	YADMC005	UNT	Implantació de les instal·lacions de bombeig a la zona del recinte entre pantalles, segons protocol de bombeig. (P - 20)	70.000,00	4,000	280.000,00
2	YADMC006	MES	Manteniment mensual del nivell freàtic rebaixat durant l'execució de les obres. Inclou sistema de seguiment d'assentaments, elements per a control del nivell freàtic, sistema d'avis mitjançant SMS als responsables de l'obra i recollida de l'aigua a instal·lació de tractament o zona d'abocament segons protocol de bombeig. (P - 21)	15.109,00	12,000	181.308,00
3	G261VP01	M	Perforació de pou de bombament realitzat pel sistema de rotoperusió clavant simultàniament la tuberia provisional recuperable d'acer de 600 mm de diàmetre, encamisat inferior de tub ranurat de 300 mm. Inclosos tots els corresponents treballs de col·locació al pou de l'esmentada camisa provisional, els treballs de la seva posterior extracció, el demèrit de la mateixa, la presa i classificació de les mostres del terreny perforat, així com l'assentament del rebiment de grava 3-5 mm i la neteja final del pou mitjançant la cullera de la vàlvula del tren de sondeigs. (P - 2)	878,06	1.280,000	1.123.916,80
4	YADMC007	M	Segellat de pou seguint la metodologia i les prescripcions de l'Agència Catalana de l'Aigua. (P - 22)	107,40	1.280,000	137.472,00

<b>TOTAL</b>	<b>Subobra</b>	<b>01.02</b>				<b>1.722.696,80</b>
--------------	----------------	--------------	--	--	--	---------------------

Obra	01	Pressupost ZONA_FRANCA_TRAMO2
Subobra	03	Partides alçades

NUM. CODI	UA	DESCRIPCIÓ	PREU	AMIDAMENT	IMPORT	
1	XPA912AC	pa	PARTIDA ALÇADA A JUSTIFICAR DE L'1% DEL PEM DE L'OBRA, PER A DESPESES D'ACCIÓ CULTURAL, SEGONS DECRET 111/1986 (P - 0)	588.521,21	1,000	588.521,21

euros

## RESUMEN DE PRESUPUESTO

**RESUM DE PRESSUPOST**

Data: 08/06/16

Pàg.: 1

NIVELL 3: Capítol			Import
Capítol	01.01.01	Pantalles	18.625.155,50
Capítol	01.01.02	Solera i coberta	21.751.782,00
Capítol	01.01.03	Ancoratges	9.799.205,52
Subobra	<b>01.01</b>	Obra Civil	<b>50.176.143,02</b>
			<b>50.176.143,02</b>
NIVELL 2: Subobra			Import
Subobra	01.01	Obra Civil	50.176.143,02
Subobra	01.02	Varis	1.722.696,80
Subobra	01.03	Partides alçades	7.388.521,21
Obra	<b>01</b>	Pressupost ZONA_FRANCA_TRAMO2	<b>59.287.361,03</b>
			<b>59.287.361,03</b>
NIVELL 1: Obra			Import
Obra	01	Pressupost ZONA_FRANCA_TRAMO2	59.287.361,03
			<b>59.287.361,03</b>

## **ANEJO D: PLAZO DE EJECUCIÓN ALTERNATIVA EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO**

### **INTRODUCCIÓN**

El objetivo del presente anejo corresponde a la cuantificación del plazo de ejecución para la alternativa de construcción del túnel a cielo abierto.

Se ha partido de los datos de los rendimientos establecidos en el presupuesto de la alternativa excavación a cielo abierto (ver anejo C) para establecer la duración de las principales actividades de dicha alternativa. Los rendimientos corresponden a los valores establecidos en el banco de referencia utilizado y que corresponden a valores contrastados por su aplicación a lo largo de un número importante de obras similares en la zona.

Posteriormente se ha establecido la relación de actividades, las relaciones entre estas con la definición y duración de las mismas. A partir de este análisis se ha procedido a la elaboración de un plan de obra mediante el programa Microsoft Project 2007 que se adjunta al final del presente anejo. El análisis ha dado lugar a una duración de la ejecución de la alternativa a cielo abierto de un total de 25 meses.



## ACTIVIDADES Y RENDIMIENTOS

Los rendimientos utilizados corresponden a los procedentes del banco de precios de Infraestructures.cat Obra Civil. A partir de las mediciones de las principales actividades y los rendimientos medios por equipo se ha procedido a una estimación de la duración de las principales actividades. Se suponen meses con 20 días por mes trabajado. En la figura D.1 se presentan los resultados del análisis realizado. Los rendimientos que figuran en la tabla corresponden a los rendimientos medios por equipo en turnos de 8 horas.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	MEDICIONES	RENDIMIENTO MEDIO POR EQUIPO	NÚMERO DE EQUIPOS	DIAS ÚTILES TRABAJADOS	TIEMPO NECESARIO EN DIAS	TIEMPO NECESARIO EN MESES	TIEMPO NECESARIO EN SEMANAS
<b>PANTALLAS</b>								
Murete guía	m	5.200	8,0	8	20	82	4,10	16,40
Pantallas	m <sup>3</sup>	62.400	58,4	8	20	134	6,70	26,80
Demolición murete guía	m	5.200	72,0	8	20	10	0,50	2,00
Demolición coronación pantalla	m	5.200	16,0	8	20	41	2,05	8,20
Vaciado pantallas	m <sup>3</sup>	260.000	440,0	8	20	74	3,70	14,80
Repicado pantallas	m <sup>2</sup>	52.000	112,0	16	20	30	1,50	6,00
<b>SOLERA I CUBIERTA</b>								
Hormigón solera	m <sup>3</sup>	26.000	296,0	8	20	11	0,55	2,20
Hormigón cubierta	m <sup>3</sup>	26.000	296,0	8	20	11	0,55	2,20
<b>ANCLAJES</b>								
Perforación anclajes	m	76.960	40,0	16	20	121	6,05	24,20
Inyección+tesado	m	625.435	280,0	16	20	140	7,00	28,00

*Figura D.1. Cálculos de la duración de las principales actividades para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto*

## PLAN DE TRABAJO

Se ha realizado un análisis de las relaciones de actividades así como de su definición y duración. Para llevar a cabo este análisis se ha supuesto que el tramo de túnel de 2.600 de longitud total se encuentra en cuatro subtramos de 650 m cada uno en los que se actúa de forma simultánea para las principales actividades de la obra. Una vez realizado el análisis detallado del plan de trabajos estableciendo el número de equipos recomendables y las duraciones necesarias así como las vinculaciones entre las diferentes actividades, resulta un plazo de ejecución para la alternativa del túnel excavado a cielo abierto de 25 meses.

La figura D.2 recoge el plan de trabajo elaborado mediante microsoft project para la alternativa de ejecución del túnel mediante excavación a cielo abierto.

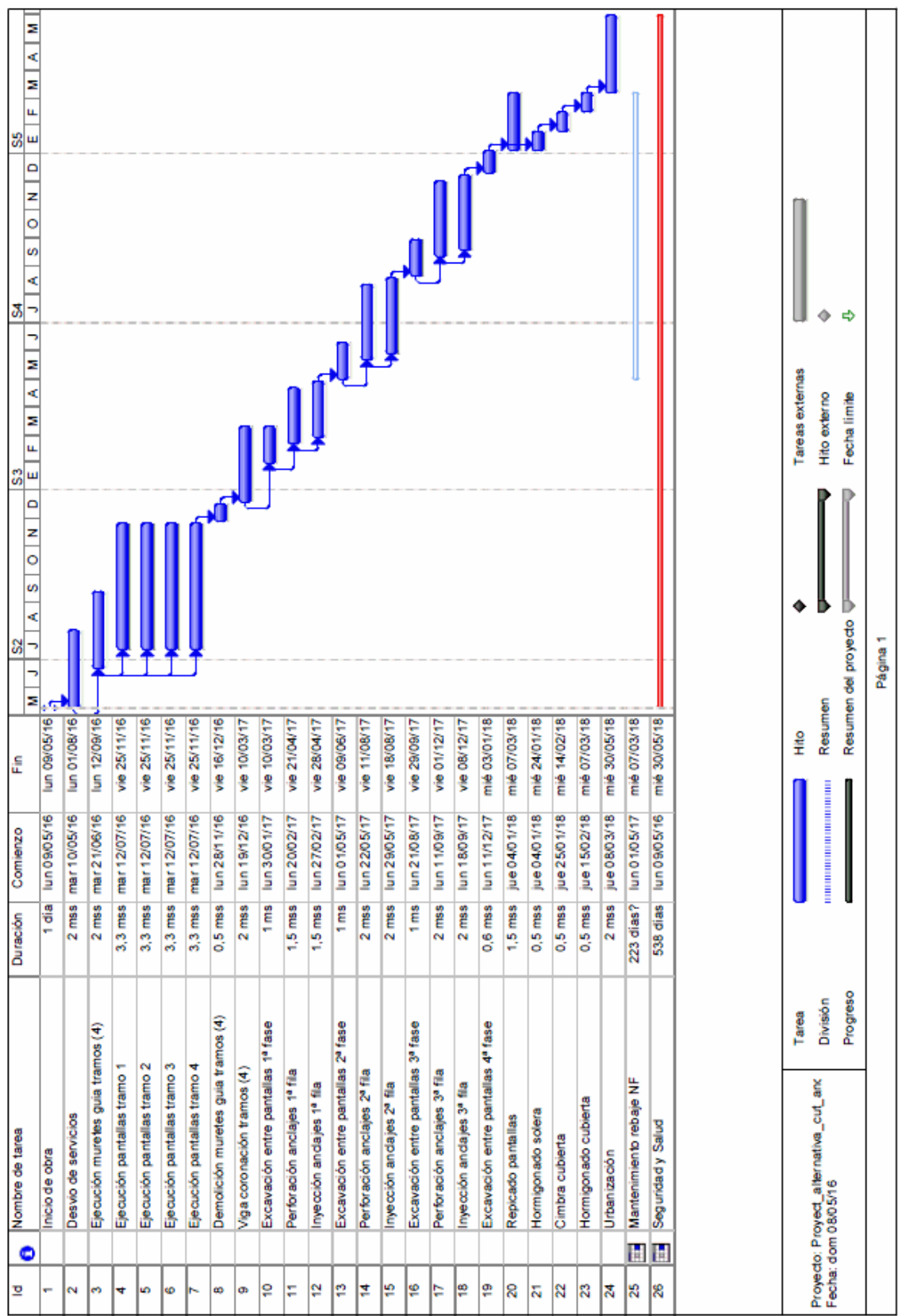


Figura D.2. Plan de trabajos elaborado para la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto.

Proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con TBM o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio



## ANEJO E: CUANTIFICACIÓN INDICADOR DE SEGURIDAD DEL OPERARIO

### INTRODUCCIÓN

En este anejo se lleva a cabo la cuantificación del indicador de seguridad del operario para las alternativas consideradas. El análisis se ha llevado a cabo identificando los riesgos de accidentes en las actividades contempladas en cada una de las alternativas. Una vez realizada esta identificación se procede a un análisis de la probabilidad y gravedad de cada riesgo identificado para cada una de las actividades.

Los riesgos laborales analizados corresponden a los recogidos en la clasificación del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Esta clasificación contempla 27 riesgos laborales. Para la identificación se ha utilizado la codificación definida por el INSHT.

La evaluación de la probabilidad de cada uno de los riesgos laborales en función de la actividad puede tomar valores de baja, media y alta. La evaluación de la gravedad de cada uno de los riesgos laborales puede tomar valores de leve, grave o muy grave. Finalmente la evaluación del riesgo laboral puede tomar valores de trivial a intolerable (5 niveles) y se establece en función de la probabilidad y de la gravedad establecida según las siguientes combinaciones que asignan un valor asociado a la evaluación (Ver tabla E.1).

Evaluación		Gravedad		
		Leve (1)	Grave (2)	Muy grave (3)
Probabilidad	Baja (1)	Trivial (1)	Tolerable (2)	Moderada (3)
	Media (2)	Tolerable (2)	Moderada (3)	Importante (4)
	Alta (3)	Moderada (3)	Importante (4)	Intolerable (5)

Tabla E.1: Evaluación de riesgos laborales en función de su probabilidad y gravedad.

La evaluación del riesgo puede tener por tanto un valor de 1 a 5. Los riesgos analizados para el conjunto de actividades son 27. A partir de la evaluación final del conjunto de riesgos identificados y evaluados se establece un índice basado en la suma de las máximas evaluaciones para el conjunto accidentes posibles. Este índice tendrá un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 135.

## RIESGOS LABORALES Y ACTIVIDADES

Los riesgos considerados corresponden a los establecidos por el INSHT en su clasificación. La lista de los riesgos laborales contemplados se recoge en la tabla E.2. La identificación de los riesgos se ha llevado a cabo a partir de los criterios recogidos en el banco de criterios de Seguridad y Salud de Obra Civil de Infraestructuras.cat. El banco de criterios permite realizar a partir del presupuesto confeccionado un estudio de seguridad y salud de la obra objeto de dicho presupuesto. Esta información ha servido de base para la generación de las fichas de actividades que contienen una evaluación de los riesgos laborales.

En el caso de la alternativa de excavación del túnel mediante tuneladora se han analizado las siguientes actividades:

- Excavación de túneles.
- Transporte y montaje de prefabricados.
- Juntas.
- Instalaciones de Baja Tensión.
- Instalaciones de Media tensión.
- Instalaciones de iluminación.

En el caso de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto se han analizado las siguientes actividades:

- Derribos.
- Vaciado entre pantallas.
- Excavaciones de pozos y zanjas.
- Carga y transporte de tierras.

- Cimientos.
- Cimentaciones profundas (pantallas).
- Pernos.
- Estructuras.
- Impermeabilizaciones.
- Pavimentos.

Nº	CÓDIGO INSHT	ACCIDENTE LABORAL
1	010	Caída de personas a distinto nivel
2	020	Caída de personas al mismo nivel
3	030	Caída de objetos por desplome o derrumbamiento
4	040	Caída de objetos en manipulación
5	050	Caída de objetos desprendidos
6	060	Pisadas sobre objetos
7	070	Choques contra objetos inmóviles
8	080	Choques contra objetos móviles
9	090	Golpes/cortes por objetos o herramientas
10	100	Proyección de fragmentos o partículas
11	110	Atrapamientos por o entre objetos
12	120	Atrapamiento por vuelco de máquinas o vehículos
13	130	Sobreesfuerzos
14	140	Exposición a temperaturas ambientales extremas
15	150	Contactos térmicos
16	161	Contactos eléctricos directos
17	162	Contactos eléctricos indirectos
18	170	Exposición a sustancias nocivas o tóxicas
19	180	Contactos con sustancias cáusticas y/o corrosivas
20	190	Exposición a radiaciones
21	200	Explosiones
22	211	Incendios. Factores de inicio
23	212	Incendios. Propagación
24	213	Incendios. Medios de lucha
25	214	Incendios. Evacuación
26	220	Accidentes causados por seres vivos
27	230	Atropellos o golpes con vehículos

*Tabla E.2: Relación de riesgos laborales considerados para el análisis de la seguridad del operario.*

## EVALUACIÓN DE RIESGOS LABORALES

A partir de la información contenida en las fichas de actividades generadas se procede a la evaluación de cada uno de los riesgos laborales para cada actividad identificada. La evaluación se realiza analizando para cada riesgo laboral en el conjunto de actividades la combinación de probabilidad y gravedad que da lugar a la máxima evaluación.

La tabla E.3 recoge la evaluación llevada a cabo para los riesgos en el caso de la alternativa de excavación de túnel mediante tuneladora.

Nº	CÓDIGO INSHT	ACCIDENTE LABORAL	Probabilidad	Gravedad	Evaluación
1	010	Caída de personas a distinto nivel	2	3	4
2	020	Caída de personas al mismo nivel	1	2	2
3	030	Caída de objetos por desplome o derrumbamiento	2	3	4
4	040	Caída de objetos en manipulación	2	3	4
5	050	Caída de objetos desprendidos	2	2	3
6	060	Pisadas sobre objetos	2	1	2
7	070	Choques contra objetos inmóviles	-	-	-
8	080	Choques contra objetos móviles	2	1	2
9	090	Golpes/cortes por objetos o herramientas	2	2	3
10	100	Proyección de fragmentos o partículas	2	2	3
11	110	Atrapamientos por o entre objetos	2	2	3
12	120	Atrapamiento por vuelco de máquinas o vehículos	2	3	4
13	130	Sobreesfuerzos	3	2	4
14	140	Exposición a temperaturas ambientales extremas	2	2	3
15	150	Contactos térmicos	2	2	3
16	161	Contactos eléctricos directos	2	3	4
17	162	Contactos eléctricos indirectos	2	2	3
18	170	Exposición a sustancias nocivas o tóxicas	2	2	3
19	180	Contactos con sustancias cáusticas y/o corrosivas	1	2	2
20	190	Exposición a radiaciones	1	3	3
21	200	Explosiones	2	3	4
22	211	Incendios. Factores de inicio	2	3	4
23	212	Incendios. Propagación	-	-	-
24	213	Incendios. Medios de lucha	-	-	-
25	214	Incendios. Evacuación	-	-	-
26	220	Accidentes causados por seres vivos	-	-	-
27	230	Atropellos o golpes con vehículos	2	3	4

Tabla E.3: Evaluación de riesgos laborales para la alternativa de excavación del túnel mediante TBM

Una vez finalizado el proceso de evaluación del conjunto de riesgos laborales realizamos el sumatorio de las evaluaciones para obtener una puntuación de 71. Este valor corresponderá a la cuantificación del indicador para la alternativa de excavación del túnel mediante tuneladora.

Realizamos el mismo procedimiento para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto. Los resultados se recogen en la tabla E.4.

Nº	CÓDIGO INSHT	ACCIDENTE LABORAL	Probabilidad	Gravedad	Evaluación
1	010	Caída de personas a distinto nivel	2	3	4
2	020	Caída de personas al mismo nivel	2	2	3
3	030	Caída de objetos por desplome o derrumbamiento	2	3	4
4	040	Caída de objetos en manipulación	2	3	4
5	050	Caída de objetos desprendidos	-	-	-
6	060	Pisadas sobre objetos	2	2	3
7	070	Choques contra objetos inmóviles	-	-	-
8	080	Choques contra objetos móviles	-	-	-
9	090	Golpes/cortes por objetos o herramientas	2	2	3
10	100	Proyección de fragmentos o partículas	2	2	3
11	110	Atrapamientos por o entre objetos	2	3	4
12	120	Atrapamiento por vuelco de máquinas o vehículos	2	3	4
13	130	Sobreesfuerzos	2	2	3
14	140	Exposición a temperaturas ambientales extremas	2	2	3
15	150	Contactos térmicos	2	2	3
16	161	Contactos eléctricos directos	1	3	3
17	162	Contactos eléctricos indirectos	-	-	-
18	170	Exposición a sustancias nocivas o tóxicas	2	2	3
19	180	Contactos con sustancias cáusticas y/o corrosivas	1	2	2
20	190	Exposición a radiaciones	-	-	-
21	200	Explosiones	-	-	-
22	211	Incendios. Factores de inicio	1 <sup>0</sup>	2	2
23	212	Incendios. Propagación	-	-	-
24	213	Incendios. Medios de lucha	-	-	-
25	214	Incendios. Evacuación	-	-	-
26	220	Accidentes causados por seres vivos	-	-	-
27	230	Atropellos o golpes con vehículos	2	3	4

Tabla E.4: Evaluación de de riesgos laborales para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto.



Una vez finalizado el proceso de evaluación del conjunto de riesgos laborales realizamos el sumatorio de las evaluaciones para obtener una puntuación de 55. Este valor corresponderá a la cuantificación del indicador para la alternativa de excavación del túnel excavado a cielo abierto.

## ANEJO F: CUANTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DEL REQUERIMIENTO MEDIOAMBIENTE

### INTRODUCCIÓN

El objetivo de este anejo corresponde a la presentación de las cuantificaciones relacionadas con los indicadores medioambientales, que se han cuantificado mediante datos medioambientales procedentes del banco *Banc Infraestructures.cat Obra Civil 2015*. Los indicadores medioambientales cuantificados en este anejo han sido los siguientes:

- Energía consumida.
- Cantidad de hormigón consumido.
- Cantidad de acero consumido.
- Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se presentan en el anejo las cuantificaciones realizadas para ambas alternativas. En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora para la estimación de la

energía consumida se ha considerado el consumo imputable a la máquina tuneladora además de la energía para la producción de los elementos de la estructura. En esta alternativa se han establecido unas mediciones estimadas del volumen de hormigón y acero en función de la sección tipo de túnel con anillo de dovelas prefabricadas de 9,4 m de diámetro. Un procedimiento similar al caso de la energía consumida se ha empleado para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los valores finales se han obtenido dividiendo los totales de cada índice por la longitud total de túnel considerada (2.600 m).

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel con excavación a cielo abierto para todos los indicadores medioambientales se ha partido de las mediciones del presupuesto elaborado y se han considerado los valores unitarios de consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> que figuran en los datos medioambientales del banco de precios considerado. Una vez calculado el total de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> se ha procedido a dividir este valor por la longitud total del túnel obteniendo los valores que han servido para la cuantificación de los indicadores del requerimiento medioambiente.

## CUANTIFICACIÓN DEL INDICADOR ENERGÍA CONSUMIDA

Para la cuantificación del indicador de energía consumida se parte de los valores medioambientales unitarios adjuntos a los precios del banco de Infraestructuras.

En el caso de la alternativa correspondiente a la excavación del túnel mediante tuneladora se ha considerado la energía consumida por la tuneladora así como la energía de producción del acero y del hormigón que conforman las dovelas. En el caso de la tuneladora se ha considerado una potencia de la misma de 3.600 kW. El plazo de ejecución calculado ha sido de 11 meses ininterrumpidos. A partir de estos datos obtenemos un consumo de energía por parte de la tuneladora de 28.512.000 kWh. Este valor dividido por la longitud de 2.600 m da como resultado un valor de 10.966 kWh/m de túnel.

La alternativa comprende una cantidad de 1.503 kg de acero por metro de túnel. Disponemos del dato procedente del banco de precios que nos indica un consumo de energía de 10,42 kWh/kg acero, multiplicando estos valores obtenemos un resultado de 15.662 kWh/m de túnel debidos al acero. Consideramos también el hormigón de la alternativa con un valor de 8,8 m<sup>3</sup>/m de túnel. A partir de los datos medioambientales del banco de precios se considera un consumo de energía de 530,33 kWh/m<sup>3</sup> de hormigón. Multiplicando ambos valores se obtiene un valor de la energía consumida para el hormigón de 4.665 kWh/m. Finalmente sumando los tres valores obtenemos un valor total de 31.293 kW/h.

En el caso de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto el proceso de cálculo de la energía consumida ha considerado las principales unidades de obra que se ejecutan. Los valores de las mediciones de estas unidades de obra se han multiplicado por los valores de consumo de energía procedentes del banco de precios de infraestructuras.cat. La suma total

de la energía en kWh obtenida se ha dividido finalmente por la longitud del túnel de 2.600 m para obtener el valor de kWh/m de la cuantificación del indicador.

En la tabla F.1 se presentan los cálculos realizados para obtener dicha cuantificación. A partir del valor total calculado se cuantifica los kWh/m de túnel construido a partir de su división por la longitud de 2.600 m. Esta división da lugar a un valor de 95.041,09 kWh/m.

Código ITEC	Partida de obra	Unidad	Medición	kWh/unidad	kWh
G3G5U205	Ejecución pantalla	m <sup>3</sup>	62.400,00	520,51	32.479.824,00
G3G20010	Murete guía	m	5.200,00	346,96	1.804.192,00
G3G2U015	Derribo murete guía	m	5.200,00	39,18	203.736,00
G3G2U020	Repicado paredes	m <sup>2</sup>	52.000,00	15,21	790.920,00
G3G2U080	Derribo coronación	m	5.200,00	110,39	574.028,00
G4B0U020	Acero B500S pantallas	Kg	5.072.578,00	10,42	52.856.266,59
G225U102	Excavación terreno	m <sup>3</sup>	299.000,00	19,97	5.971.030,00
G3Z1U010	Hormigón limpieza	m <sup>2</sup>	52.000,00	26,45	1.375.400,00
G4B0U020	Acero solera/cubierta	Kg	8.970.000,00	10,42	93.467.400,00
G4BP0006	Anclajes solera/cubierta	U	31.200,00	89,18	2.782.416,00
G450U070	Hormigón solera/cubierta	m <sup>3</sup>	52.000,00	388,31	20.192.120,00
G7B1U050	Filtro geotextil	m <sup>2</sup>	59.800,00	7,84	468.832,00
G711U002	Membrana flexible	m <sup>2</sup>	59.800,00	35,22	2.106.156,00
G774U010	Lámina drenante	m <sup>2</sup>	59.800,00	26,20	1.566.760,00
G4DEU010	Cimbra	m <sup>3</sup>	260.000,00	3,81	990.600,00
G3L1U300	Perforación anclajes	m	79.960,00	0,56	42.758,98
G3L1U400	Acero anclajes	kg	625.435,20	47,03	29.414.217,46
YADMC005	Implantación bombeo	u	4,00	5.042,64	20.170,55
<b>TOTAL</b>					<b>247.106.827,57</b>

Tabla F.1. Energía consumida para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto

## CUANTIFICACIÓN DEL INDICADOR HORMIGÓN CONSUMIDO

Para este indicador debemos estimar la cantidad de hormigón consumido en cada una de las alternativas consideradas en m<sup>3</sup>/m de túnel.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora los elementos de hormigón corresponden al anillo de dovelas con un volumen de 8,8 m<sup>3</sup>/m de túnel que corresponde a la cuantificación de este indicador para la alternativa..

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto se han considerado las mediciones de hormigón de la solución proyectada. Los valores corresponden a 62.400 m<sup>3</sup> correspondientes a las pantallas, los 5.200 m<sup>3</sup> del hormigón de limpieza, los 26.000 m<sup>3</sup> de la

cubierta y los 26.000 m<sup>3</sup>. La suma de estos elementos da lugar a un total de 119.600 m<sup>3</sup>. Dividiendo este valor total por la longitud del túnel de 2.600 m se obtiene un valor de 46 m<sup>3</sup>/m de túnel que corresponde a la cuantificación de este indicador para esta alternativa.

## CUANTIFICACIÓN DEL INDICADOR ACERO CONSUMIDO

En este indicador hemos de estimar la cantidad de acero consumido para cada una de las dos alternativas consideradas.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel mediante tuneladora a partir de las cuantías de acero en los elementos de dovelas que componen los anillos del túnel se establece un valor de 1,50 t/m de túnel.

En el caso de la alternativa de ejecución del túnel a cielo abierto se han considerado las mediciones de acero para los elementos establecidos en el presupuesto. En el caso de las pantallas corresponden a un total de 5.072,58 toneladas, para la cubierta y solera corresponde a un total de 8.970,00 toneladas mientras que en el caso de los anclajes corresponden a 625,44 toneladas. La suma de estos parciales es de 14.668,01 toneladas. Esta cantidad total dividida por la distancia del túnel de 2.600 m da lugar a 5,64 t/m que corresponde a la cuantificación de este indicador para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto.

## CUANTIFICACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

En el caso de este indicador debemos estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> para cada una de las alternativas consideradas. En este caso nuevamente partimos de los valores medioambientales unitarios adjuntos a los precios del banco de Infraestructuras.

En el caso de la alternativa correspondiente a la excavación del túnel mediante tuneladora se ha considerado la emisión de CO<sub>2</sub> correspondiente a la ejecución del túnel mediante la tuneladora. Este aspecto corresponde a un total de 4,75 t de CO<sub>2</sub> por metro de túnel. El hormigón del túnel corresponde a unas emisiones de 4,63 t de CO<sub>2</sub> por metro de túnel mientras que el acero del túnel corresponde a unas emisiones de 3,09 t de CO<sub>2</sub> por metro de túnel. La suma de estos valores da un total de 12,47 t de CO<sub>2</sub>/m de túnel. Finalmente estos valores se han incrementado en un 20% debido a la consideración de la construcción de la tuneladora y el transporte de la máquina hasta el emplazamiento de la obra.

En el caso de la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto el proceso de cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> ha considerado nuevamente las principales unidades de obra que se ejecutan. Los valores de las mediciones de estas unidades de obra se han multiplicado por los valores de emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes del banco de precios de infraestructuras.cat. La suma total de CO<sub>2</sub> emitido obtenido se ha dividido finalmente por la longitud del túnel de

2.600 m para obtener el valor de CO<sub>2</sub>/m de la cuantificación del indicador. En la tabla F.2 se presentan los cálculos realizados para obtener dicha cuantificación.

Código ITEC	Partida de obra	Unidad	Medición	Kg CO <sub>2</sub> /unidad	Kg CO <sub>2</sub>
G3G5U205	Ejecución pantalla	m <sup>3</sup>	62.400,00	351,82	21.953.568,00
G3G20010	Murete guía	m	5.200,00	174,92	909.584,00
G3GZU015	Derribo murete guía	m	5.200,00	36,31	188.812,00
G3GZU020	Repicado paredes	m <sup>2</sup>	52.000,00	14,30	743.600,00
G3GZU080	Derribo coronación	m	5.200,00	103,80	539.760,00
G4B0U020	Acero B500S pantallas	Kg	5.072.578,00	3,08	15.623.541,37
G225U102	Excavación terreno	m <sup>3</sup>	299.000,00	18,78	5.615.220,00
G3Z1U010	Hormigón limpieza	m <sup>2</sup>	52.000,00	15,02	781.040,00
G4B0U020	Acero solera/cubierta	Kg	8.970.000,00	3,08	27.627.600,00
G4BP0006	Anclajes solera/cubierta	U	31.200,00	28,32	883.584,00
G450U070	Hormigón solera/cubierta	m <sup>3</sup>	52.000,00	257,48	13.388.960,00
G7B1U050	Filtro geotextil	m <sup>2</sup>	59.800,00	4,17	249.366,00
G711U002	Membrana flexible	m <sup>2</sup>	59.800,00	18,64	1.114.672,00
G774U010	Lámina drenante	m <sup>2</sup>	59.800,00	19,09	1.141.582,00
G4DEU010	Cimbra	m <sup>3</sup>	260.000,00	1,98	514.800,00
G3L1U300	Perforación anclajes	m	79.960,00	0,20	15.392,00
G3L1U400	Acero anclajes	kg	625.435,20	25,18	15.748.458,34
YADMC005	Implantación bombeo	u	4,00	4.741,69	18.966,77
TOTAL					<b>107.058.506,48</b>

Tabla F.2. CO<sub>2</sub> emitido para la alternativa de excavación del túnel a cielo abierto

A partir del valor calculado se obtiene un total de 107.058,51 t de CO<sub>2</sub> que dividido por la longitud total del túnel de 2.600 m da lugar a un valor de 41,18 t de CO<sub>2</sub>/m de túnel que corresponde al cuantificador de este indicador para la alternativa considerada.

## ANEJO G: DATOS Y RESULTADOS DE LOS MÓDULOS DEL PROGRAMA MIVES

### INTRODUCCIÓN

En este anejo se recogen los datos de entrada y los resultados obtenidos mediante la herramienta MIVES desarrollada por la UPC. Este programa informático consta de una estructura modular con 3 módulos denominados módulo programador, módulo usuario y módulo reporte.

El módulo programador permite la generación del modelo introduciendo las variables necesarias para la creación de la herramienta de valoración. El primer paso consiste en la identificación de la toma de decisión definiendo los componentes y el ciclo de vida. Con posterioridad se procede a la introducción del árbol de toma de decisiones con las funciones de valor de cada indicador y por último se asignan los pesos a los indicadores, criterios y requerimientos. El módulo usuario corresponde a la aplicación del modelo de valoración. En este módulo se introducen las cuantificaciones de todos los indicadores de las alternativas estudiadas. El módulo reporte corresponde al módulo donde se analizan los resultados obteniéndose los índices de valor de cada una de las alternativas. El módulo permite además obtener los valores de todos los indicadores, criterios y requerimientos con gráficos comparativos de tipo pastel, barras o tablas.

## DATOS MÓDULO PROGRAMADOR

Se presentan los datos introducidos en el módulo programador que conforman el árbol de toma de decisiones.

### ESTUDIO ALTERNATIVAS TÚNEL ZONA FRANCA (V.1)

Descripción del modelo

Modelo: Estudio alternativas túnel Zona Franca

Versión: 1

Fecha de elaboración: 27/05/2016

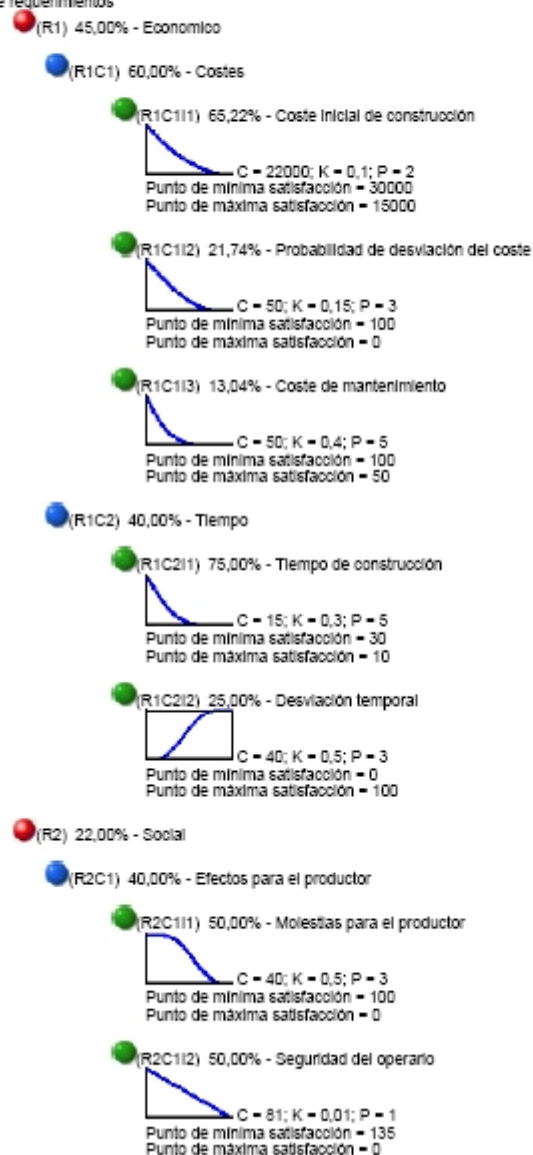
Realizado por: José Ruiz

Referencia:

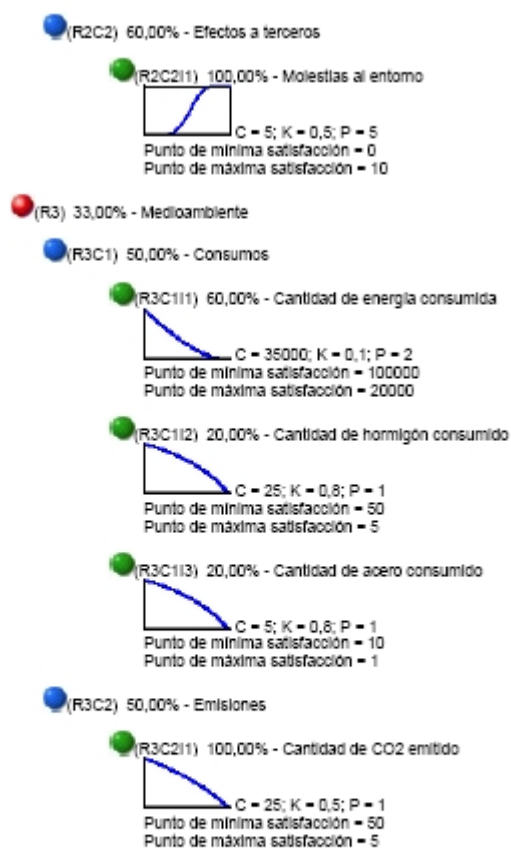
Localización: Barcelona

Descripción: Proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con TBM o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio.

Árbol de requerimientos







Componentes  
 (C1) Túnel 2.600 m Zona Franca

Etapas del ciclo de vida  
 Construcción  
 Explotación

## RESULTADOS MÓDULO REPORTE

Se presentan asimismo los resultados obtenidos al final del proceso mediante el módulo reporte de MIVES.

### PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

#### Definición de alternativas y propiedades del reporte

Proyecto: Tesina

Modelo: Estudio alternativas túnel Zona Franca

Fecha de elaboración: 16/05/2016

Localización: Barcelona

Realizado por: José Ruiz

Referencia:

Versión: 1

Descripción: Proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con TBM o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis

#### Alternativas

Alternativa 1: Alternativa excavación tuneladora

Alternativa 2: Alternativa excavación cielo abierto

### PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

#### Unidades físicas

	<u>Alt. 1</u>	<u>Alt. 2</u>
(R1) Económico		
(R1C1) Costes		
(R1C1I1) Coste inicial de construcción (€/m túnel)	22305	22803
(R1C1I2) Desviación probable del coste (% desviación coste)	12,2	20
(R1C1I3) Coste de mantenimiento (€/m)	55,17	57,01
(R1C2) Tiempo		
(R1C2I1) Tiempo de construcción (meses)	11	25
(R1C2I2) Desviación temporal (Puntuación)	85	55
(R2) Social		
(R2C1) Efectos para el productor		
(R2C1I1) Molestias para el productor (Puntuación)	30	55
(R2C1I2) Seguridad del operario (Evaluación riesgos)	71	55
(R2C2) Efectos a terceros		
(R2C2I1) Molestias al entorno (Puntuación)	10	2,85
(R3) Medioambiente		
(R3C1) Consumos		
(R3C1I1) Cantidad de energía consumida (kWh/m)	31293	95041
(R3C1I2) Cantidad de hormigón consumido (m3/m)	8,8	46
(R3C1I3) Cantidad de acero consumido (t/m)	1,5	5,6
(R3C2) Emisiones		
(R3C2I1) Cantidad de CO2 emitido (t/m)	14,97	41,18

## PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

### Unidades normalizadas

	<u>Alt. 1</u>	<u>Alt. 2</u>
(R1) Economico		
(R1C1) Costes		
(R1C1I1) Coste inicial de construcción (€/m túnel)	0,27	0,23
(R1C1I2) Desviación probable del coste (% desviación coste)	0,80	0,66
(R1C1I3) Coste de mantenimiento (€/m)	0,69	0,60
(R1C2) Tiempo		
(R1C2I1) Tiempo de construcción (meses)	0,87	0,00
(R1C2I2) Desviación temporal (Puntuación)	0,99	0,73
(R2) Social		
(R2C1) Efectos para el productor		
(R2C1I1) Molestias para el productor (Puntuación)	0,82	0,49
(R2C1I2) Seguridad del operario (Evaluación riesgos)	0,48	0,59
(R2C2) Efectos a terceros		
(R2C2I1) Molestias al entorno (Puntuación)	1,00	0,17
(R3) Medioambiente		
(R3C1) Consumos		
(R3C1I1) Cantidad de energía consumida (kWh/m)	0,79	0,00
(R3C1I2) Cantidad de hormigón consumido (m3/m)	0,96	0,16
(R3C1I3) Cantidad de acero consumido (t/m)	0,97	0,66
(R3C2) Emisiones		
(R3C2I1) Cantidad de CO2 emitido (t/m)	0,85	0,27

## PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

### Requerimientos

	<u>Alt. 1</u>	<u>Alt. 2</u>
1. Economico	0,280	0,140
2. Social	0,190	0,070
3. Medioambiente	0,280	0,070

## PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

### Criterios

	<u>Alt. 1</u>	<u>Alt. 2</u>
1. Costes	0,117	0,099
2. Tiempo	0,162	0,032
3. Efectos para el productor	0,057	0,048
4. Efectos a terceros	0,132	0,022
5. Consumos	0,142	0,030
6. Emisiones	0,142	0,046

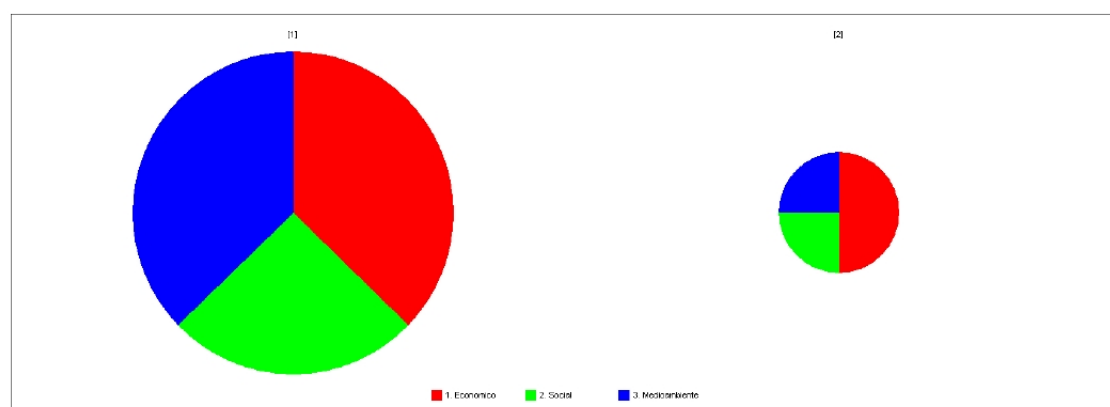
## PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

### Indicadores

	Alt. 1	Alt. 2
1. Coste inicial de construcción	0,049	0,041
2. Desviación probable del coste	0,046	0,038
3. Coste de mantenimiento	0,024	0,022
4. Tiempo de construcción	0,117	0,000
5. Desviación temporal	0,045	0,032
6. Molestias para el productor	0,036	0,022
7. Seguridad del operario	0,021	0,026
8. Molestias al entorno	0,132	0,022
9. Cantidad de energía consumida	0,078	0,000
10. Cantidad de hormigón consumido	0,031	0,005
11. Cantidad de acero consumido	0,031	0,021
12. Cantidad de CO2 emitido	0,140	0,045

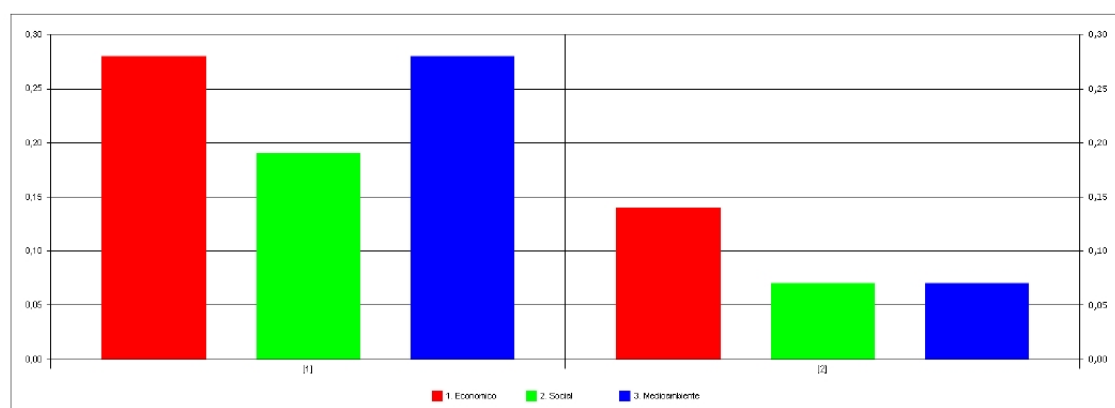
### PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

Gráfico pastel Requerimientos



### PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

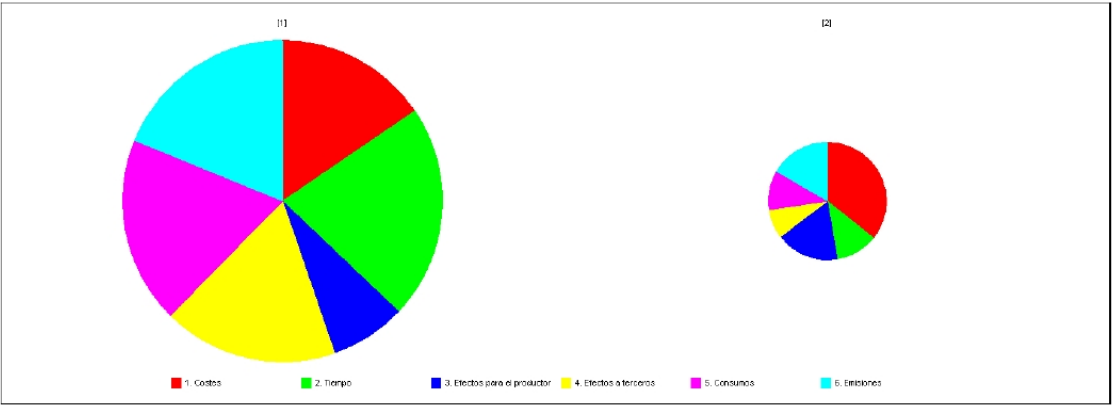
Gráfico barras Requerimientos



Proceso de toma de decisión entre ejecutar un túnel con TBM o a cielo abierto mediante el empleo de técnicas de análisis multicriterio

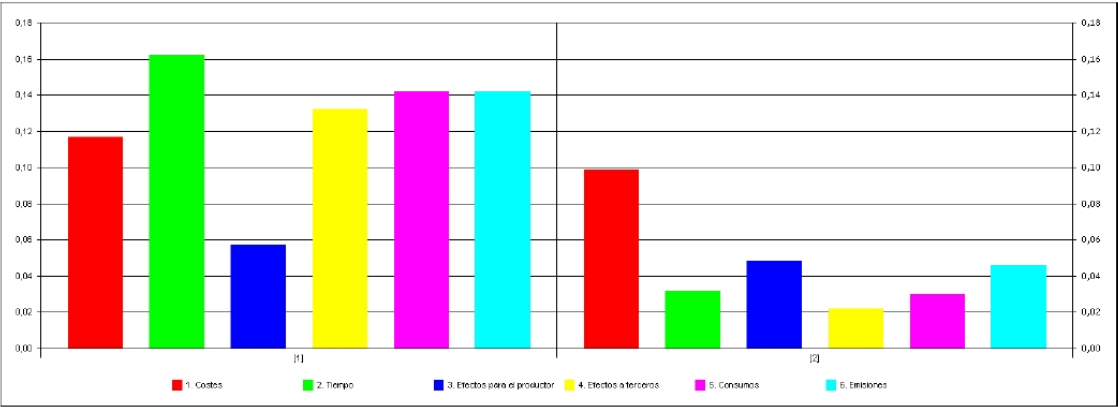
PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

Gráfico pastel Criterios



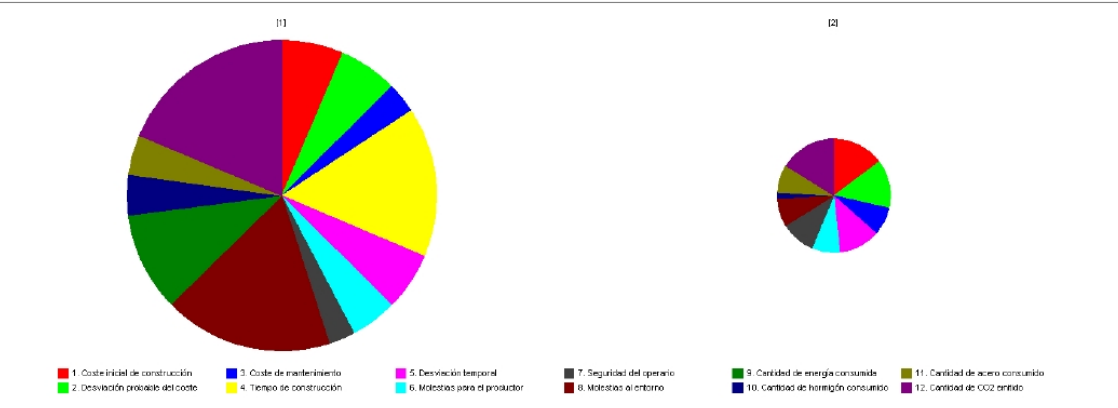
PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

Gráfico barras Criterios



PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca

Gráfico pastel Indicadores



**PROYECTO: Reporte final análisis alternativas Zona Franca**

Gráfico barras Indicadores

